

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Andrius DZEDZICKIS

ATOMINIŲ JĖGŲ MIKROSKOPO JUTIKLIO
MECHANINĖS STRUKTŪROS
MODELIAVIMAS IR DINAMINIŲ
CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (T 009)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2019

Disertacija rengta 2014–2019 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. dr. Vytautas BUČINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Dalius MAŽEIKA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009).

Nariai:

prof. habil. dr. Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009),

prof. habil. dr. Albertas MALINAUSKAS (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, chemija – N 003),

habil. dr. Roman Adam SZEWCZYK (Varšuvos technologijos universitetas, Lenkija, mechanikos inžinerija – T 009),

prof. dr. Vytautas TURLA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2019 m. kovo 22 d. 13 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2019 m. vasario 21 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2019-003-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-155-3

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2019

© Andrius Dzedzickis, 2019

andrius.dzedzickis@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Andrius DZEDZICKIS

**MODELLING OF MECHANICAL
STRUCTURE OF ATOMIC FORCE
MICROSCOPE SENSOR AND RESEARCH
OF ITS DYNAMIC CHARACTERISTICS**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (T 009)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2019

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2014–2019.

Supervisor

Prof. Dr Vytautas BUČINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Mechanical Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Dalius MAŽEIKA (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009).

Members:

Prof. Dr Habil. Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009),

Prof. Dr Habil. Albertas MALINAUSKAS (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Chemistry – N 003),

Dr Habil. Roman Adam SZEWCZYK (Warsaw University of Technology, Poland, Mechanical Engineering – T 009),

Prof. Dr Vytautas TURLA (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Mechanical Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **1 p. m. on 22 March 2019**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 21 February 2019.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama atominių jėgų mikroskopo greitaveikos problema. Pagrindinis tyrimo objektas yra atominių jėgų mikroskopo mechaninio jutiklio dinaminiai procesai. Pagrindinis disertacijos tikslas – ištirti atominių jėgų mikroskopo (AFM) sistemą, sudarant teorinius ir eksperimentinius dinaminių savybių valdymo modelius, kurie leistų keisti atominių jėgų mikroskopo jutiklio dinamines savybes nekeičiant jo konstrukcijos.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: pasiūlomas metodas, leidžiantis padidinti atominių jėgų mikroskopo greitaveiką, sudaromas matematinis modelis skirtas teoriškai įvertinti siūlomo metodo efektyvumą ir parinkti tinkamus valdymo sistemos parametrus. Pasiūlyto AFM greitaveikos didinimo metodo efektyvumas bei sukurto modelio adekvatumas patikrinami eksperimentiniais tyrimais.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Jame pateikta atominių jėgų mikroskopų, jų darbo režimų bei nagrinėjamoje srityje atliktų mokslinių tyrimų analizė. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateiktas atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros matematinis modelis. Pateikiami baigtinių elementų metodu atlikti aerodinaminės jėgos poveikio jutikliui tyrimai bei pagal siūlomą metodą modifikuoto atominių jėgų mikroskopo jutiklio modeliavimo rezultatai.

Trečiajame skyriuje pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai, leidžiantys įvertinti siūlomo greitaveikos didinimo metodo efektyvumą ir taikymo galimybes.

Disertacijos tema paskelbti septyni straipsniai: du – žurnaluose, įtrauktose į Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazę, vienas – konferencijų medžiagoje, referuotoje Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazėje, keturi – kitų tarptautinių duomenų bazių žurnaluose. Disertacijos tema perskaityti keturi pranešimai tarptautinėse konferencijose.

Abstract

The dissertation examines the problem related to the scanning speed of an atomic force microscope. The object of research is the dynamic processes of the mechanical sensor of the atomic force microscope (AFM). The main aim of this thesis is to perform research on the AFM creating theoretical and experimental models of surface scanning system, which allows to adjust the atomic force microscope sensor's dynamic characteristics without changing its design.

There are several tasks solved in the work: there is proposed method, which allows increasing the scanning speed of the atomic force microscope; created mathematical model of improved AFM sensors which allows theoretically evaluate the efficiency of the proposed method and to select the appropriate parameters for a control system. The efficiency of the proposed AFM speed increase method and the adequacy of the developed model are confirmed by experimental research.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references and a list of publications by the author on the topic of the dissertation.

The introductory chapter discusses the research problem and the relevance of the work, describes the object of the research, formulates the aim and tasks of the work, describes the research methodology, the scientific novelty of the work, the practical significance of the work results, and the defended statements. The published publications and presented reports on the topic of the dissertation as well as the structure of the dissertation are presented at the end of the introduction.

The first chapter is dedicated to the literature review. It contains an overview of atomic microscopes, their working modes and scientific researches performed in this field. At the end of the chapter, conclusions are formulated and the tasks of the dissertation are refined.

The second chapter presents the mathematical model of mechanical part of the atomic force microscope sensor. There are presented results of theoretical research using two different methods: aerodynamic force impact study using finite element method and the results of modeling of the modified AFM sensor using proposed methodology.

The third section is dedicated to experimental research of AFM sensor, which determines the efficiency of the offered scanning speed-enhancement method and the feasibility of the application.

Seven articles were published on the topic of the dissertation: two in journals included in the Clarivate Analytics WoS database, one in conference materials included in the Clarivate Analytics WoS database, four in other international database journals. The results of the dissertation are presented at four international conferences.

Žymėjimai

Simboliai

L – atstumas nuo ortakio galo iki svirtelės viršutinio paviršiaus;
 H – nuskenuotos struktūros aukštį apibūdinantis parametras;
 PF – parametras, apibūdinantis signalo priekinio fronto statumą;
 GF – parametras, apibūdinantis signalo galinio fronto statumą.

Santrumpos

AFM – Atominių jėgų mikroskopas (angl. AFM – Atomic force microscope);
AJM – Atominių jėgų mikroskopija;
BEM – Baigtinių elementų metodas;
MEMS – Mikroelektromechaninių sistemų technologija;
MJM – Magnetinių jėgų mikroskopija.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	5
Disertacijos struktūra	5
1. ATOMINIŲ JĖGŲ MIKROSKOPŲ JUTIKLIŲ IR JŲ TYRIMŲ ANALIZĖ	7
1.1. Atominių jėgų mikroskopai	7
1.2. Atominių jėgų mikroskopų jutiklių konstrukcijos apžvalga	12
1.3. Atominių jėgų mikroskopų greಿತaveikos didinimo metodų analizė	14
1.4. Analizinių-skaitinių atominių jėgų mikroskopo jutiklio tyrimų apžvalga	18
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	22
2. ATOMINIŲ JĖGŲ MIKROSKOPO JUTIKLIO ANALIZINIAI-SKAITINIAI TYRIMAI	25
2.1. Atominių jėgų mikroskopo jutiklio tikslumo teorinių tyrimų metodika	25

2.2. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio modeliavimas.....	27
2.2.1. Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros modeliavimas.....	29
2.2.2. Teoriniai aerodinaminės jėgos poveikio tyrimai.....	35
2.2.3. Teoriniams atominių jėgų mikroskopo jutiklio tikslumo tyrimams naudojami bandiniai.....	46
2.3. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio mechaninės struktūros modeliavimo rezultatai	50
2.3.1. Atominių jėgų mikroskopo standžiojo jutiklio modeliavimo rezultatai....	53
2.3.2. Atominių jėgų mikroskopo slankiojo jutiklio modeliavimo rezultatai	55
2.4. Antrojo skyriaus išvados	58
 3. EKSPERIMENTINIAI ATOMINIŲ JĖGŲ MIKROSKOPO MODIFIKUOTO JUTIKLIO TYRIMAI.....	61
3.1. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio eksperimentinių bandymų stendas ir įranga	61
3.2. Modifikuoto atominių jėgų mikroskopo eksperimentinių tyrimų metodika	66
3.2.1. Svirtelę veikiančios aerodinaminės jėgos tyrimų metodika	66
3.2.2. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio tikslumo tyrimų metodika	67
3.3. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio tikslumo eksperimentinių tyrimų rezultatai.....	68
3.3.1. Svirtelę veikiančios aerodinaminės jėgos tyrimų rezultatai	68
3.3.2. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio tikslumo tyrimų rezultatai	71
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	78
 BENDROSIOS IŠVADOS	81
 LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	83
 AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ..	91
 SUMMARY IN ENGLISH.....	93
 PRIEDAI ¹	109
A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija	111
B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.....	122
C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	123

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
The relevance of the thesis	2
The object of research	2
The aim of the thesis	3
The tasks of the thesis	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings	4
Defended statements.....	4
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	5
1. ANALYSIS OF ATOMIC FORCE MICROSCOPE SENSORS AND THEIR RESEARCHES.....	7
1.1. Atomic force microscopes.....	7
1.2. Review of structure of atomic force microscope sensors	12
1.3. Analysis of atomic force microscope scanning speed increasing methods.....	14
1.4. Review of analytical-numerical researches about AFM sensors	18
1.5. Conclusions of the first chapter and formulation of dissertation tasks	22

2. ANALYTICAL-NUMERICAL RESEARCH OF THE ATOMIC FORCE MICROSCOPE SENSOR.....	25
2.1. Methodology of theoretical research of the accuracy of atomic force microscope sensor	25
2.2. Modelling of a modified sensor of atomic force microscope	27
2.2.1. Modelling of mechanical structure of atomic force microscope sensor.....	29
2.2.2. Theoretical research of impact of aerodynamic force.....	35
2.2.3. Samples used for the theoretical research of accuracy of atomic force microscope sensor.....	46
2.3. Modelling results of the mechanical structure of modified sensor of atomic force microscope	50
2.3.1. Modelling results of atomic force microscope stiff sensor	53
2.3.1. Modelling results of atomic force microscope soft sensor.....	55
2.4. Conclusions of the second chapter	58
3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE MODIFIED SENSOR OF ATOMIC FORCE MICROSCOPE	61
3.1. Test rig and equipment of experimental research of modified sensor of atomic force microscope.....	61
3.2. Methodology of experimental research of modified atomic force microscope .	66
3.2.1. Methodology of the research of aerodynamic force impact.....	66
3.2.2. Methodology of the accuracy research of modified sensor of atomic force microscope.....	67
3.3. Results of experimental accuracy research of modified sensor of atomic force microscope	68
3.3.1. Results of the research of aerodynamic force impact.....	68
3.3.2. Results of the accuracy research of modified sensor of atomic force microscope.....	71
3.4. Conclusions of the third chapter.....	78
GENERAL CONCLUSIONS	81
REFERENCES	83
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE SUBJECT OF THE DISSERTATION	91
SUMMARY IN ENGLISH.....	93
ANNEXES ¹	107
Annex A. Declaration of academic integrity.....	111
Annex B. The co-authors' agreements for providing the materials of the joint publications in the doctoral dissertation.....	122
Annex C. Copies of the scientific publications by the author on the subject of the dissertation.....	123

¹ The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Ivadas

Problemos formulavimas

Vykstant mokslo ir technologijos progresui naujai gaminami įrenginiai ir prietaisai tampa vis mažesni, todėl atsiranda vis didesnis poreikis atlikti tyrimus nanotechnologijų srityje. Tokiems tyrimams vykdyti optiniai prietaisai yra netinkami dėl fizikinių reiškinių ribos – šviesos bangos ilgio, kuris apriboja optinių prietaisų taikymą nanotechnologijose. Vienas iš sėkmingai taikomų metodų įvertinant nanometrinių dydžių paviršių topologiją yra atominių jėgų mikroskopija (toliau – AJM). Taikant šį metodą, paviršius yra skenuojamas zonu – plona adata, o jutiklis (gembė), ant kurio zondas yra pritvirtintas, išsilenkia priklausomai nuo paviršiaus savybių. Šis metodas leido vizualizuoti mikro ir nano struktūras, tačiau jo taikymas iškėlė naujų problemų. Paviršiaus skenavimo procesas yra pakankamai lėtas ir ribojamas atominių jėgų mikroskopo mechaninio jutiklio dinaminių charakteristikų. Šis klausimas yra vis dar aktualus, nors AJM technika yra taikoma paviršiams tirti jau net nuo 1986-ųjų.

Šiuo metu vykdomus atominių jėgų mikroskopų (toliau – AFM) tobulinimo tyrimus pagal jų pobūdį galima suskirstyti į keletą sričių: bandinio pozicionavimo sistemos dinaminių charakteristikų tyrimai, optinės matavimo sistemos tyrimai,

jutiklio mechaninės struktūros tyrimai. AFM dažniausiai naudojami siekiant nustatyti medžiagos paviršiaus struktūros formą, bet gali būti naudojami ir tiriant tokias medžiagų ir jų paviršių savybes kaip adhezija, trintis ar klampa.

Vis daugėjant mokslinių tyrimų, kuriems atlikti reikalingas AFM, išlieka aktualus klausimas kaip padidinti šio įrenginio darbo greitį bei kaip parinkti skenavimo režimus, dirbant su skirtingomis medžiagomis.

Remiantis anksčiau atliktais tyrimais galima teigti, jog AFM skenavimo greitis labiausiai yra ribojamas jutiklio mechaninės struktūros dinaminių charakteristikų. Ši struktūra yra pagrindinė mikroskopo mechaninė detalė, kurios gamybos procesas yra labai sudėtingas. Rinkoje ne visada galima rasti jutiklių, kurių charakteristikos būtų tinkamiausios skenuojant konkrečių tiriamųjų medžiagų paviršius, todėl geriausių jutiklio charakteristikų užtikrinimo klausimas šiuo metu išlieka aktualus.

Disertacijoje pagrindinis dėmesys skirtas atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros kaip dinaminės sistemos tyrimui ir jos charakteristikų valdymui.

Darbo aktualumas

Sparčiai augant mokslo tyrimų, kuriuose naudojami AFM skaičiui, mažas AFM skenavimo greitis išlieka aktualia problema. Siekiant padidinti skenavimo greitį tenka išspręsti daug naujų mokslinių ir technologinių uždavinių. Atliekant AFM jutiklio mechaninės struktūros skaitinę ir eksperimentinę analizę, susiduriama su sudėtingu tiriamos sistemos analitinio modelio sudarymu bei skaičiavimo problemomis.

AFM jutiklio mechaninės struktūros dinaminių savybių tyrimas ir jų valdymas leidžia pasiekti reikalingus AFM jutiklio parametrus matuojant įvairiais režimais. Šis tyrimas leido sukurti metodiką mechaninės jutiklio dalies charakteristikoms valdyti. Siūlomas metodas leis padidinti atominių jėgų mikroskopų skenavimo greičius, iš esmės nekeičiant originalių mikroskopų konstrukcijų.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – atominių jėgų mikroskopo mechaninio jutiklio dinaminiai procesai.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – ištirti AFM, sudarant teorinius ir eksperimentinius paviršiaus skenavimo sistemos dinaminių savybių valdymo modelius.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti AFM jutiklių tyrimų mokslinės literatūros apžvalgą, nustatyti pagrindinius AFM greitaveiką ribojančius veiksnius.
2. Sudaryti matematinę aerodinaminės jėgos poveikiu valdomo AFM jutiklio modelį.
3. Ištirti ir įvertinti modifikuoto AFM jutiklio tinkamumą tirti įvairių medžiagų paviršiaus struktūrą padidintais greičiais.
4. Sukurti tyrimų standą, skirtą AFM jutiklio charakteristikoms įvertinti.
5. Įvertinti AFM tikslumą, naudojant modifikuotą jutiklį, palyginus nuskenuoto etaloninio paviršiaus formą su gamintojo deklaruojama paviršiaus forma.

Tyrimų metodika

Darbe atlikti teoriniai skaičiavimai pagrįsti teorinės mechanikos, virpesių teorijos ir matavimų teorijos dėsniais, pritaikant analitinius, empirinius bei skaitinius tyrimo metodus. Teoriniams ir eksperimentiniams tyrimams buvo naudojami originalūs bandiniai, pagaminti Vokietijos Braunšveigo technikos universiteto Mikrotechnologijų institute, taikant fotolitografijos metodą. Pagamintų bandinių paviršiaus topografija buvo vertinama naudojant kontaktinius ir bekontaktinius matavimo metodus. Gauti rezultatai panaudoti siekiant išsiaiškinti teorines AFM greitaveikos didinimo galimybes. Praktiniai eksperimentai buvo atlikti Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro (VMTI FTMC) Fizikos instituto laboratorijose, naudojant patobulintą AFM su siūlomu jutikliu. Eksperimentų metu buvo tiriamas padidinto skenavimo greičio poveikis matavimo rezultatų kokybei. Gauti rezultatai buvo vertinti atliekant lyginamąją analizę – lyginant patobulinto AFM matavimo rezultatus su etalonu.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie mechanikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Pasiūlytas ir ištirtas metodas, leidžiantis padidinti AFM jutiklio greitaveiką nekeičiant AFM konstrukcijos.
2. Sudarytas modifikuoto AFM jutiklio matematinis modelis, leidžiantis parinkti valdymo parametrus, kai sistemos standumas valdomas naudojant mechatroninę oro srauto valdymo sistemą.
3. Sukurtas ir pagamintas originalus mechatroninis eksperimentinių tyrimų standas, kuriame AFM jutiklio valdymui naudojamas suspausto oro srautas.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Taikant pasiūlytą AFM jutiklio greitaveikos didinimo metodą, sutrumpėja bandinių skenavimo laikas. Sukuriama galimybė suderinti AFM jutiklio parametrus pagal skenuojamos medžiagos paviršiaus savybes. Toks parametrų derinimas efektyviai padidina skenavimo rezultatų patikimumą. Taikant sukurtą metodiką skenavimo metu yra keičiamos jutiklio struktūros dinaminės savybės, taip sumažinant skenavimo metu pasitaikančią kontakto praradimo tarp skenuojančio zondo ir tiriamo paviršiaus galimybę skenuojant dideliais greičiais.

Pasiūlytas metodas gali būti pritaikytas ir kitais įrenginio panaudojimo atvejais, kai reikia keisti AFM jutiklio svirtelės dinamines charakteristikas arba valdyti jutiklio svirtelės poslinkius manipuliuojant įvairiomis nanostruktūromis.

Ginamieji teiginiai

1. Sudarytas modernizuotą AFM aprašantis matematinis modelis leidžiantis įvertinti AFM jutiklio svirtelės dinaminį atsaką skenuojant skirtingų savybių bandinių paviršius įvairiais greičiais.
2. Siūlomas AFM greitaveikos didinimo metodas yra universalus: gali būti taikomas įvairiems AFM, ženkliai nekeičiant jų konstrukcijos; gali būti taikomas AFM jutiklio įvairaus standumo svirtelėms; yra tinkamas matuoti skirtingų savybių bandinius.

3. Siūlomas greಿತaveikos didinimo metodas leidžia pagerinti AFM matavimo rezultatų kokybę. Nuskenuoto paviršiaus profilio nuokrypis nuo etaloninio horizontalioje ašyje, zondui leidžiantis žemyn, esant 847,6 $\mu\text{m/s}$ skenavimo greičiui, vidutiniškai sumažėja 20 % lyginant su nemodifikuotu AFM.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti septini moksliniai straipsniai: du – žurnaluose, įtrauktose į Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazę, vienas – konferencijų medžiagoje, referuotoje Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazėje, keturi – kitų tarptautinių duomenų bazių žurnaluose. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti keturiose tarptautinėse mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Tarptautinėje konferencijoje „13th International conference on Dynamical Systems Theory and Applications“ 2015 m. Lodzėje, Lenkijoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „International conference Mechatronics ideas for industrial applications“ 2015 m. Gdanske, Lenkijoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „11th International Conference Mechatronic Systems and Materials“ 2015 m. Kaune, Lietuvoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „Advanced materials and technologies: 19th international conference-school“ 2017 m. Palangoje, Lietuvoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados.

Darbo apimtis yra 108 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudota 32 numeruotos formulės, 43 paveikslai ir 4 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 103 literatūros šaltiniai.

Atominių jėgų mikroskopų jutiklių ir jų tyrimų analizė

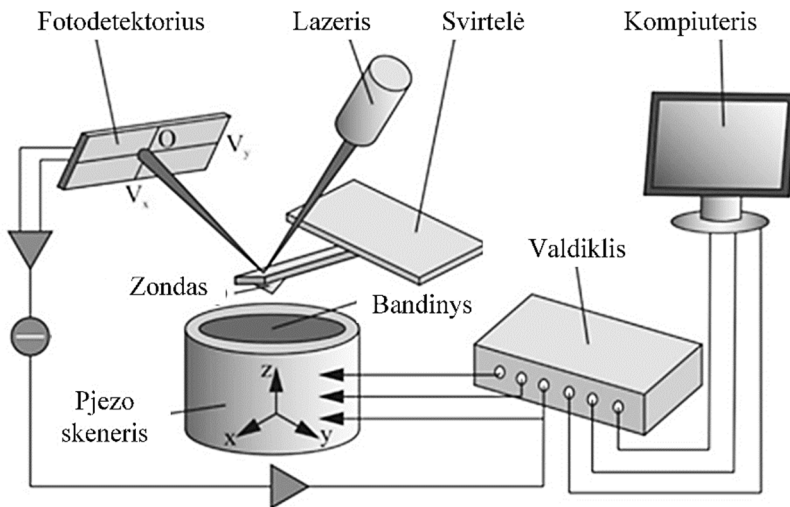
Skyriuje apžvelgiamos pagrindinės atominių jėgų mikroskopų ir jų jutiklių savybės. Analizuojami galimi AFM greitaveikos didinimo metodai, pateikiama kitų mokslininkų atliktų mokslinių tyrimų apžvalga. Skyriaus tematika yra paskelbti du moksliniai straipsniai (Dzedzickis, Bučinskas 2014, Bučinskas *et al.* 2016).

1.1. Atominių jėgų mikroskopai

Pirmasis atominių jėgų mikroskopas buvo sukurtas 1986 metais IBM tyrimų laboratorijoje. Pradiniame etape šis įrenginys buvo patobulinta 1980 metais sukurto skenuojančio tunelinio mikroskopo versija. Pirmasis komercinis AFM modelis buvo sukurtas 1989 metais ir greitai tapo vienu iš pagrindinių mokslininkų naudojamų įrankių (Binnig *et al.* 1986). Kasmet vis labiau vystantis mokslui ir technologijoms surandamos naujos AFM pritaikymo galimybės (Andriukonis *et al.* 2018, Tolenis *et al.* 2018, Gruskiene *et al.* 2018, Hou *et al.* 2017, Ikai *et al.* 2017), tačiau dažniausiai AFM yra naudojami medžiagų paviršių struktūrų formos nustatymui bei medžiagos paviršiaus fizinių savybių tyrimams nanometrų lygmenyje (Lindley 2012).

AFM savo esme yra vienas iš skenuojančiojo zondo mikroskopų. AFM veikimas pagrįstas vienodos jėgos užtikrinimu tarp skenuojančio zondo ir tiriamojo paviršiaus. Šio principo panaudojimas atominių jėgų mikroskopui suteikė pagrindinį privalumą lyginant jį su jo pradininku skenuojančiu tunelinio mikroskopu – AFM gali dirbti su elektros srovei nelaidžiomis medžiagomis (Lindley 2012).

AFM darbo metu zondas yra vertikaliai prispaudžiamas prie tiriamojo bandinio paviršiaus tam tikra pradine jėga (1–100 nN), kurios dydis bus palaikomas pastovus, ir bandinys pradeda judinti horizontalioje plokštumoje. Vykstant skenavimo procesui, matuojamą zondą laikančios svirtelės deformacija ir sąveikos jėga tarp zondo ir paviršiaus yra palaikoma pastovi tokiu būdu: jei sąveikos jėga didėja, zondo prispaudimo jėga yra mažinama pakeliant jį vertikaliai aukštyn, jei sąveikos jėga mažėja, zondas prispaudžiamas prie tiriamojo paviršiaus. Zondą laikančios svirtelės svyravimai bandiniui statmenoje plokštumoje atitinka bandinio paviršiaus topografiją. Jei skenavimo metu norima tirti ne tik paviršiaus topografiją, tuomet yra matuojama daugiau parametrų, kurie apibūdina svirtelės deformacijas skirtingomis kryptimis (Dzedzickis, Bučinskas 2014). Struktūrinė AFM schema yra pateikta 1.1 paveiksle.



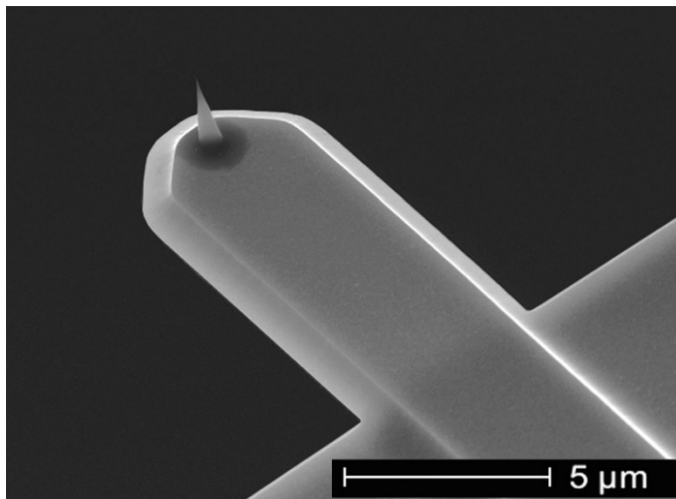
1.1 pav. Struktūrinė atominių jėgų mikroskopo schema (Bučinskas *et al.* 2016)

Fig. 1.1. Structural scheme of atomic force microscope (Bučinskas *et al.* 2016)

Nagrinėjant AFM kaip mechatroninį įrenginį ir remiantis schema, pateikta 1.1 paveiksle, AFM sąlyginai galima suskirstyti į keletą paprastesnių tarpusavyje sąveikaujančių sistemų: tiriamo bandinio pozicionavimo sistema, mechaninė AFM jutiklio sistema, zondo poslinkių matavimo sistema.

Bandinio pozicionavimo sistema dažniausiai būna trijų laisvės laipsnių. Šią sistemą sudaro precizinių pavarų ir kreipiančiųjų rinkinys, kuris leidžia pozicionuoti bandinį x , y ir z kryptimis. AFM pozicionavimo sistemos dažniausiai turi du tikslumo lygius: apytikslio ir tikslaus pozicionavimo. Apytiksliam pozicionavimui dažniausiai naudojamos precizinės, mikrometrinio tikslumo sraigtinės pavaros su žingsniniais varikliais arba rankiniu būdu valdomos sraigtinės pavaros. Tiksliam pozicionavimui ir skenavimui naudojamos pjezoelektrinės pavaros (Binnig *et al.* 1986).

Mechaninę jutiklio sistemą sudaro skenuojantis zondas ir jį laikanti svirtelė. Svirtelė ir zondas dažniausiai yra gaminami iš monolitinės medžiagos, naudojant fotolitografijos ir ėsdinimo technologijas. Tipinė AFM jutiklio mechaninė sistema pavaizduota 1.2 paveiksle.



1.2 pav. Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninė struktūra (Hosaka *et al.* 2000)

Fig. 1.2. Mechanical structure of atomic force microscope sensor (Hosaka *et al.* 2000)

AFM jutiklio mechaninė sistema yra viena iš svarbiausių mikroskopo dalių, nuo jos dinaminių savybių tiesiogiai priklauso skenavimo rezultatų tikslumas ir patikimumas (Hosaka *et al.* 2000). Nepaisant to, kad jutiklio konstrukcija nesikeičia jau daug metų, ir kad yra sukauptas didžiulis žinių kiekis, jutiklio svirtelės modeliavimo ir optimalių geometrinių parametų paieškos klausimas išlieka ak-

tualus. Jutiklio mechaninės sistemos dinaminės charakteristikos tebėra mažai nagrinėta sritis, ypač siekiant didinti mikroskopo skenavimo greitį ir matavimo rezultatų tikslumą ir patikimumą (Dzedzickis, Bučinskas 2014).

AFM jutiklio svirtelės svyravimai dažniausiai yra matuojami naudojant optinę atstumo matavimo sistemą (Russell–Pavier *et al.* 2018), kurią sudaro šviesos šaltinis (lazeris) ir jutiklis (šviesos taško pozicijai jautrus fotodiodas). Lazero spindulys yra nukreipiamas į viršutinį AFM svirtelės paviršių zondo tvirtinimo vietoje, kaip pavaizduota 1.1 paveiksle. Nuo svirtelės paviršiaus atsispindėjęs spindulys yra nukreipiamas į jutiklį. Svirtelėi svyruojant kinta nuo jos atsispindinčio lazerio spindulio kampas. Atsispindėjusio spindulio kampo pokytis jutiklio paviršiuje sukuria linijinį lazerio spindulio poslinkį, kuris naudojant fotodiodų matricą yra išmatuojamas ir paverčiamas analoginiu elektriniu signalu. Speciali programinė įranga susieja pozicionavimo sistemos ir svirtelės svyravimo duomenis bei sukuria trimatį bandinio paviršiaus vaizdą.

Literatūroje yra aprašomi daugelio autorių bandymai matuoti svirtelės svyravimus naudojant pjezoelektrinius, talpinius, pjezovaržinius efektus, bet jų naudojimas yra pakankamai sudėtingas ir tik atskiros mokslininkų grupės juos taiko spręsdamos specifinius uždavinius (Nishida *et al.* 2008, Rugar *et al.* 1989, Göddenhenrich 1990, Giessibl *et al.* 1994).

Toliau bus aptariami atominių jėgų mikroskopų darbo režimai. Priklausomai nuo zondo ir bandinio paviršiaus kontakto skenavimo metu, skiriami trys pagrindiniai AFM darbo režimai: kontaktinis režimas, bekontaktis režimas ir dinaminio kontakto režimas (Gianangelo, Bodil 2013, Chih *et al.* 2007, Tello, Garcia 2001).

Mikroskopui dirbant kontaktiniu režimu, skenuojantis zondas 1–2 Å atstumu seka bandinio paviršių. Skenavimo rezultatai gaunami tiesiogiai matuojant zondą laikančios svirtelės deformaciją arba analizuojant pozicionavimo sistemos z ašies grįžtamojo ryšio signalą, kuris naudojamas pastoviai sąveikos jėgai tarp zondo ir bandinio paviršiaus užtikrinti. Kadangi apytiksliai pastovaus signalo matavimas įneša triukšmo ir nulinės padėties nuokrypio paklaidas, siekiant pagerinti naudojimo signalo ir triukšmo santykį naudojamos mažesnio standumo svirtelės. Toks darbo režimas leidžia gauti tikrąjį kieto kūno bandinio paviršiaus vaizdą nepaisant jį dengiančių vandens ar kitų medžiagų sluoksnių. Dėl stiprių paviršinių jėgų zondas yra pritraukiamas prie bandinio paviršiaus ir jis tarsi „praduria“ bandinį dengiantį vandens sluoksnį (Gianangelo, Bodil 2013).

Vienas pagrindinių kontaktinio režimo privalumų yra toks, jog tiriant paviršiaus topografiją kartu galima nustatyti ir kitas savybes, pavyzdžiui, trinties jėgas, elektrines charakteristikas ir kita. Kontaktinis skenavimo režimas užtikrina didžiausią skiriamąją gebą, didžiausią skenavimo greitį bei leidžia skenuoti didesnio šiurkštumo paviršius negu kiti metodai (Butt *et al.* 2005, Nishida *et al.* 2008).

Pagrindinis kontaktinio režimo trūkumas yra tas, kad skenavimo greitis yra ribojamas svirtelės rezonansinio dažnio. Didinant skenavimo greitį, didėja svirtelės priverstinių svyravimų dažnis, todėl svirtelės dažniui priartėjus prie rezonansinio, zondo ir bandinio paviršiaus kontaktas tampa nestabilus, o skenavimo rezultatai – netikslūs (Dzedzickis *et al.* 2015). Kitas kontaktinio skenavimo režimo trūkumas yra tas, kad jis tinka ne visoms medžiagoms. Tiriant minkštas medžiagas, tokias kaip biologinės medžiagos ir polimerai, egzistuoja didelė tikimybė, kad zondas pažeis jų paviršius. Skenuojant nehomogenines medžiagas, jų paviršiuje gali veikti skirtingo dydžio paviršinės jėgos, kurios gali paveikti skenavimo rezultatų tikslumą (Magonov 1996, Zakaria, Aziz 2018, Lei *et al.* 2018, Agmon *et al.* 2018).

Bekontaktis skenavimo metodas dažniausiai naudojamas minkštoms (biologinėms ir organinėms) medžiagoms tirti. Dirbant tokiu režimu, speciali pavara, sumontuota AFM svirtelės tvirtinimo vietoje, kinematiškai žadina svirtelės pagrindą ir priverčia svirtelę virpėti rezonansiniu dažniu. Zondui artėjant prie medžiagos, dėl veikiančių paviršinių jėgų keičiasi svirtelės virpesių dažnis ir amplitudė, analizuojant šiuos pokyčius yra nustatoma bandinio paviršiaus padėtis arba klampa, trinties ar paviršinių jėgų reikšmės (Chih *et al.* 2007). Bekontaktis skenavimo metodas yra labai jautrus aplinkos sąlygoms. Tokiu atveju būtina užtikrinti sąlygas, jog medžiagą dengiantis skysčio sluoksnis būtų plonesnis už atstumą, kuriame veikia paviršinės jėgos. Tuo atveju, kai vandens sluoksnis yra storesnis, egzistuoja tikimybė, jog zondo viršūnė įstrigs skysčio sluoksnyje ir dėl veikiančių paviršinių traukos jėgų palies bandinio paviršių. Kontaktas su skenuojamu paviršiumi iškraipo matavimo rezultatų tikslumą. Siekiant išspręsti šią problemą buvo sukurtas dinaminio kontakto skenavimo režimas (Zhong *et al.* 1993).

Skenuojant dinaminio skenavimo režimu svirtelės pagrindas yra kinematiškai žadinamas, analogiškai kaip ir bekontakčio skenavimo atveju, skiriasi tik žadinimo amplitudė, kuri yra apie 10 kartų didesnė negu bekontaktinio skenavimo atveju ir gali siekti iki 200 nm. Zondo viršūnei artėjant prie bandinio paviršiaus, svirtelės virpesių amplitudė mažėja dėl zondą veikiančių paviršinių jėgų, bet dėl savo inercijos zondas akimirkai paliečia bandinio paviršių. Mikroskopo *z* ašies grįžtamasis ryšis yra suderintas taip, jog visada stengiamasi palaikyti vienodą zondo svyravimo amplitudę. Skenavimo rezultatai yra gaunami atvaizduojant sąveikos jėgas tuose taškuose, kur zondas palietė bandinio paviršių (Gross *et al.* 2009). Palyginus su kontaktiniu ir bekontakčiu darbo režimais, dinaminio kontakto režimas turi savo privalumų, jo skiriamoji geba yra didesnė už bekontakčio režimo, be to, šis režimas leidžia tirti minkštesnes medžiagas negu kontaktinis režimas. Pagrindinis dinaminio kontakto režimo trūkumas, jog jis yra truputį lėtesnis už kontaktinį skenavimo režimą.

1.2. Atominių jėgų mikroskopų jutiklių konstrukcijos apžvalga

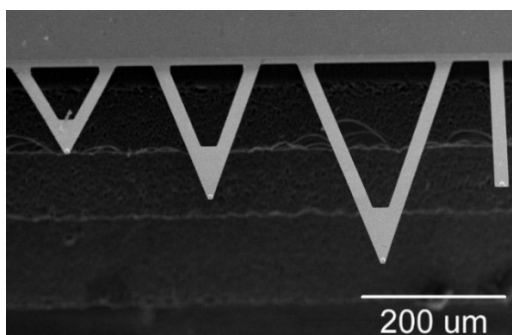
Dažniausiai AFM jutiklį sudaro dvi sistemos: jautri mechaninė struktūra ir elektroninė matavimo sistema.

Pirmųjų atominių mikroskopų jutikliai buvo gaminami iš deimantinės adatos, kuri buvo tvirtinama prie 25 mikrometrų storio ir 0,8 milimetro ilgio aukso folijos atplaišos. Aukso folijos gabalėlis, kurio vienas galas buvo tvirtinamas nejudamai, atlikdavo svirtelės vaidmenį. Būtent ši svirtelė ir leisdavo adatai judėti paviršiui statmena kryptimi. Ši svirtelė buvo pati sudėtingiausia mikroskopo mechaninė detalė. Ją buvo sudėtinga pagaminti, nes reikėjo pasiekti, kad ji būtų pakankamai plona ir deformuotųsi dėl sąveikos jėgų, veikiančių tarp deimantinės adatos antgalio ir tiriamojo paviršiaus. Svirtelė taip pat turėjo būti pakankamai lengva, kad jos savasis virpesių dažnis siektų kelis tūkstančius hercų. Esant žemesniems rezonansiniams dažniams atsiranda tikimybė, jog darbo metu adata nebeseks paviršiaus, bet pradės virpėti rezonansiniu svirtelės dažniu (Lindley 2012).

Idėja AFM jutikliuose naudoti dinamiškai jautrią mechaninę sistemą išliko nepakitusi per visą AFM egzistavimo laikotarpį, keitėsi tik svirtelės ir zondo geometrinė forma, matmenys ir jų gamybai naudojamos medžiagos (Dzedzickis 2014).

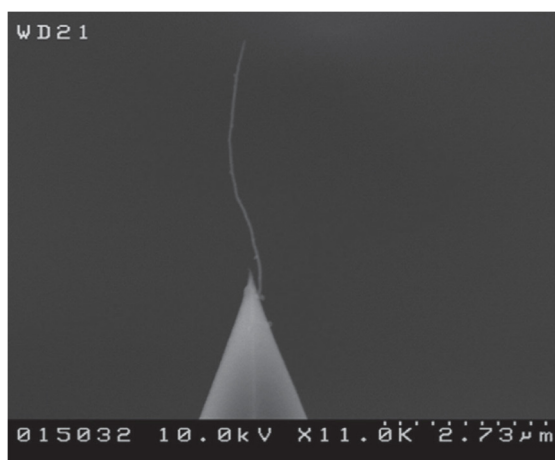
Šiuolaikinių standartinių AFM jutiklių mechaninės struktūros paprastai yra gaminamos iš vientiso silicio (Si) arba silicio nitrido (Si_3Ni_4) ruošinio, naudojant fotolitografijos ir ęsdinimo arba MEMS technologijas (Lindley 2012, Boisen *et al.* 1996, Farooquit *et al.* 1992). Šiuo metu gaminama daug skirtingo modelio svirtelių su skirtingais parametrais. Svirtelių ilgis dažniausiai svyruoja nuo 40 μm iki 500 μm , plotis siekia iki 50 μm , storis nuo 0,5 μm iki 8 μm . Zondo ilgis dažniausiai neviršija 10 mikrometrų, zondo viršūnės suapvalinimo spindulys siekia kelis nanometrus. Jėgos konstanta, kurį apibūdina svirtelės standumą, svyruoja nuo 0,01 N/m iki 50 N/m (Russel 2008). Siekiant naudingiau išnaudoti medžiagas bei sutaupyti laiką, gamybos metu gaminama keletas skirtingų svirtelių, pritvirtintų prie vieno bendro laikiklio. Tokia struktūra yra pavaizduota 1.3 paveiksle.

Paskutiniu metu literatūroje vis dažniau pasirodo straipsniai, aprašantys bandymus pagaminti zondus su smalesnėmis viršūnėmis. Mažesnis viršūnės suapvalinimo spindulys padeda išspręsti du uždavinius: padidinti AFM skenavimo rezoliuciją bei sumažinti zondo viršūnės dilimą. Šiuo metu naudojamos gamybos technologijos yra pasiekusios savo ribas ir gaminti zondus su mažesniais viršūnės apvalinimo spinduliais naudojant tik silicį jau nėra įmanoma. Patobulinti jutikliai yra gaminami ant zondo viršūnės formuojant galio nitrido (GaN), vario oksido (CuO) nanometrų eilės storio vielas arba anglies nanovamzdelius, kaip pavaizduota 1.4 paveiksle (Stevens 2009, Weber *et al.* 2014, Hosoi *et al.* 2014).



1.3 pav. Skirtingos atominių jėgų mikroskopo jutiklio svirtelės pritvirtintos prie vieno pagrindo <http://nanotechweb.org/cws/article/tech/17122>

Fig. 1.3. Different cantilevers atomic force microscope sensor attached to one base
<http://nanotechweb.org/cws/article/tech/17122>



1.4 pav. Anglies nanovamzdelis suformuotas ant atominių jėgų mikroskopo zondo viršūnės (Stevens 2009)

Fig. 1.4. Carbon nanotube located on the atomic force microscope probe (Stevens 2009)

Ant zondo viršūnės suformuotų nanostruktūrų ilgis būna apie 5 μm , diametras – apie 25 nm.

Galio nitrido nanovielos ir anglies nanovamzdelių naudojimas leido sukurti gerokai atsparesnius dilimui AFM jutiklius: net kontaktiniu režimu nuskenavus keletą bandinių, tokių jutiklių zonų viršūnės išlieka smalesnės negu 150 nm (Stevens 2009, Weber *et al.* 2014). Naudojant vario oksido nanovielas, pavyko

sukurti veikiančius jutiklius, tačiau jų tikslumas buvo šiek tiek mažesnis už standartinių AFM jutiklių. Tikslumo sumažėjimą lėmė nanovielos deformacijos skenavimo metu (Hosoi *et al.* 2014). Pramoninėje gamyboje anksčiau aptartas metodas kol kas dar nėra naudojamas, nes nėra technologijų, kurios užtikrintų, kad suformuotos nanostruktūros turės vienodas savybes (Stevens 2009).

Kiekvieną kartą, kai norima kokią nors bandinį ištirti su AFM, svirtelės pasirinkimas yra atskiras tyrimo uždavinys. Svirtelės pasirinkimą lemia siekiamas gauti duomenų tikslumas, tiriamos medžiagos fizinės savybės, skenavimo greitis, skenavimo režimas bei tyrimus atliekančio mokslininko patirtis.

Nepaisant to, kad jutiklio struktūra nesikeičia jau daug metų ir yra sukaupta didžiulė jutiklių naudojimo patirtis, svirtelės modeliavimo ir optimalių geometrinių parametrų paieškos klausimas išlieka aktualus. Jutiklio mechaninės sistemos dinaminės charakteristikos tebėra mažai ištirtos, ypač didinant mikroskopo skenavimo greitį ir matavimo rezultatų tikslumą ir patikimumą (Dzedzickis, Bučinskas 2014).

1.3. Atominių jėgų mikroskopų greitaveikos didinimo metodų analizė

Literatūroje daugiausiai aprašomi AFM greitaveikos didinimo metodai, kurių veikimas pagrįstas svirtelės parametrų pokyčiais. Teoriškai egzistuoja du metodai, leidžiantis išvengti netikslumų, atsirandančių dėl AFM svirtelės dinaminės charakteristikų:

1. Pasirinkti tokius skenavimo režimus, kad skenuojant paviršių, svirtelės svyravimo dažnis būtų daug didesnis už svirtelės pirmąjį rezonansinį dažnį (*fundamental resonant frequency*);
2. Koreguoti svirtelės dinamines savybes taip, kad jos pirmasis rezonansinis dažnis pasislinktų į didesniąją pusę.

Vieni pirmųjų šioje srityje mokslinius tyrimus atliko Neumeisteris ir Dukedas (Neumeister, Ducked) 1994 metais. Jie nustatė priklausomybes tarp trikampės svirtelės geometrinių parametrų ir svirtelės standumo šonine, statmena paviršiui ir išilgine kryptimis. Mokslininkai užrašė šių priklausomybių matematines išraiškas bei pasiūlė matematinį modelį, leidžiantį nustatyti svirtelės storį naudojant eksperimentinius rezonansinio dažnio matavimo rezultatus (Neumeister, Ducked 1994). Šių mokslininkų gauti rezultatai leido teigti, kad greitam skenavimui geriausiai tinka trumpos standžios trikampės svirtelės.

Atominių jėgų mikroskopo jutiklio charakteristikas tyrė ir iki šiol tyrinėja daugelis mokslininkų (Glover *et al.* 2018, Yang *et al.* 2018). Vienas iš galimų

AFM greitaveikos didinimo metodų yra aprašytas (Rogers *et al.* 2004). Mokslininkų grupė pasiūlė pagerinti AFM jutiklio svirtelės dinamines charakteristikas, padengiant svirtelės paviršių plona cinko oksido (ZnO) plėvele ir taip siekiant sukurti galimybę matuoti bei valdyti svirtelės poslinkius. Pagrindinis šio metodo privalumas yra galimybė tiesiogiai, nenaudojant optinių matavimo sistemų, nuo svirtelės nuskaityti skenavimo duomenis ir valdyti svirtelės poslinkius. Tyrimai parodė, jog toks duomenų nuskaitymo būdas garantuoja dvigubai didesnę jautrumą negu naudojant optines matavimo sistemas, be to, šis metodas leidžia vienu metu skenuoti bandinį keliomis lygiagrečiomis svirtelėmis (Satoh *et al.* 2013).

AFM dažnai naudojamas biologijos mokslų srityje tiriant bakterijas ir kitas biologines medžiagas, kurios padengtos skysčiu. Tokiam atvejui mokslininkai sukūrė izoliuotą AFM jutiklį su pjezoelektrine plėvele, kuris gali dirbti dinaminio kontakto režimu skystyje (Rogers *et al.* 2003).

Svirtelę, padengtą pjezoelektrinės medžiagos plėvele, naudojo ir kita mokslininkų grupė (Matthew *et al.* 2011). Jų tyrimo tikslas buvo sukurti metodą, kuris leistų padidinti AFM dinaminio kontakto režimo skenavimo tikslumą. Jie siekė eliminuoti paklaidas, kurios atsiranda, kai skenuojamame paviršiuje yra dideli nelygumai (statūs laipteliai, duobutės stačiais kraštais). Šie mokslininkai siekė realizuoti idėją, jog naudojant pjezoelektrinę plėvelę galima pakeisti svirtelės standumą arba slopinimą ir taip valdyti svirtelės virpesių amplitudę.

Svirtelės, padengtas įvairaus tipo pjezoelektrinėmis plėvelėmis, tyrinėjo daug mokslininkų iš įvairių šalių. Makartis ir Mahmudas (McCarty R., Mahmood N.S.) tyrinėjo svirtelės reakciją į netiesines sąveikos jėgas tarp zondo ir bandinio paviršiaus, išvedė svirtelės virpesių lygtį, užrašė svirtelės virpesių modų analitines išraiškas (McCarty, Mahmood 2014). Korajamas ir Nahavandis (Korayem M.H., Nahavandi A.) modeliavo svirtelės su dviem pjezoelektrinės plėvelės sluoksniais, jų elgesį skystyje, priklausomai nuo skysčio lygio ir tiriamo paviršiaus šiurkštumo (Korayem, Nahavandi 2015). Satohas (Satoh) aprašė tokio tipo svirtelių panaudojimo galimybes artimojo lauko skenuojančioje optinėje mikroskopijoje (Satoh *et al.* 2014).

Pagrindiniai AFM jutiklio svirtelės padengtos pjezoelektrine plėvele trūkumai yra neoptimali skenuojančio zondo forma, santykinai didelis svirtelės storis ir vidiniai įtempimai pjezoelektrinėje dangoje (Rogers *et al.* 2004).

Nemažai mokslinių tyrimų buvo atlikta siekiant surasti optimalų santykį tarp svirtelės rezonansinio dažnio ir jos standumo. Manipuliuojant geometriniais parametrais buvo mėginama sukurti svirtelės, tinkamas greitajam skenavimui.

Mokslininkai Vu (Wu) ir Stirlingas (Stirling) savo darbuose tyrė svirtelių charakteristikų priklausomybes nuo zondo charakteristikų. Straipsnyje (Wu *et al.* 2003) aprašoma zondo ilgio, zondo viršūnės formos, statmeno paviršiui ir šoninio kontakto standumo įtaka AFM jutiklio jautrumui bei svirtelės rezonansiniam dažniui. Straipsnyje (Stirling, Shaw 2013) aprašomi svirtelės, skirtos bekontakčiam

AFM režimui tyrimai. Mokslininkai sukūrė svirtelę, kurios zondo ilgis apytiksliai lygus svirtelės ilgiui. Savo straipsnyje mokslininkai pateikė svirtelės matematinį modelį, įvertino ilgo zondo įtaką svirtelės dinaminėms charakteristikoms, patvirtino (Wu *et al.* 2003) išvadą, kad AFM jutiklio dinaminiai parametrai priklauso ne tik nuo svirtelės, bet ir nuo zondo geometrijos.

Zondo geometrinių parametrų įtaką viso AFM jutiklio charakteristikoms nagrinėjo ir Odinas (Odin) savo darbe (Odin *et al.* 1994). Mokslininkai tyrė zondo kūgiškumo ir viršūnės apvalinimo kampo įtaką AFM skenavimo tikslumui bei pasiūlė metodą, kaip atlikus žinomos medžiagos bandomąjį skenavimą galima nustatyti zondo viršūnės apvalinimo spindulį ir zondo kūgiškumą.

Hosakos (Hosaka) straipsnyje aprašomas AFM greitaveikos didinimo metodas pagrįstas specialios geometrinės formos svirtelių naudojimu (Hosaka *et al.* 2000). Pagrindinis šių mokslininkų tikslas buvo sukurti ir išbandyti trikampio formos 7–20 μm ilgio ir 0,3 μm storio svirtelės, kurių rezonansinis dažnis yra apie 6,6 MHz. Straipsnyje (Hosaka *et al.* 2000) aprašomas tokių svirtelių gamybos procesas, nauja svirtelės poslinkių matavimo sistema bei eksperimentinių bandymų rezultatai.

Panašius į Hosakos (Hosaka) tyrimus, kai keičiant svirtelių geometriją, buvo mėginama sukurti svirtelės, turinčias tam tikrus rezonansinius dažnius, atliko ir nemažai kitų mokslininkų. Pedersenas (Pedersen) savo straipsnyje aprašo bandymus sukurti AFM jutiklio svirtelę, kurios rezonansinis dažnis būtų didesnis esant tam pačiam standumui (Pedersen 2000). Straipsnyje (Hodges *et al.* 2001) aprašomas bandymas pagaminti svirtelės su aukštesniais rezonansiniais dažniais naudojant lazerines precizines mikroapdirbimo technologijas (*angl.* ion beam milling). Idėja pagrįsta tuo, kad naudojant tikslesnes už litografiją apdirbimo technologijas yra įmanoma pagaminti arba modifikuoti trikampes svirtelės siaurinant jų kraštines.

Sadevaseris (Sadewasser) savo straipsnyje (Sadewasser *et al.* 2006) aprašo baigtinių elementų modelį, kuris leidžia optimizuoti AFM jutiklio svirtelių geometriją ir pastumti rezonansinius dažnius vienas kito atžvilgiu. Naudodami savo modelį mokslininkai suprojektavo ir pagamino svirtelę, kurios antrasis rezonansinis dažnis buvo maksimaliai pastumtas į žemesnę pusę.

Straipsnyje (Cai *et al.* 2015) pristatomas matematinis modelis, kuris projektavimo eigoje leidžia modifikuoti svirtelės geometrinius parametrus taip, kad tarp svirtelės rezonansinių dažnių būtų išlaikomas griežtai nurodytas santykis.

Nepaisant daugybės atliktų tyrimų ir sukaupų žinių, svirtelės geometrijos modifikavimas nėra pats geriausias metodas padidinti AFM greitaveiką. Pagrindinis metodo trūkumas yra tai, kad jis nėra universalus, o svirtelės su specifiniais parametrais gali būti naudojamos spręsti tik tam uždaviniui, kuriam jos buvo pritaikytos. Be to, svirtelių gamybos arba modifikavimo procesas yra sudėtingas, brangus bei neįmanomas be specializuotos įrangos.

Florinas (Florin) 1994 metais pasiūlė AFM greitaveikos metodą, kuris buvo pagrįstas AFM jutiklio svirtelės charakteristikų valdymu. Pagrindinis šio mokslininko pasiūlyto metodo privalumas tai, jog jis buvo universalesnis negu aprašyti aukščiau: sukurtas ir išbandytas bekontaktis AFM jutiklio svirtelės dinaminis charakteristikų valdymo metodas, kuris leido tiesiogiai valdyti zondo ir bandinio paviršiaus sąveikos jėgą (Florin *et al.* 1994). Buvo nustatyta, jog tam tikrais atvejais tiesioginis sąveikos jėgos valdymas leidžia padidinti skenavimo greitį dirbant dinaminio kontakto režimu. Sąveikos jėga tarp zondo ir bandinio paviršiaus buvo valdoma naudojant išorinį magnetinį lauką, kuris veikdavo magnetine medžiaga padengtą zondo paviršių (Florin *et al.* 1994). Pagrindinis Florino (Florin) pasiūlyto metodo apribojimas yra tai, kad išorinis magnetinis laukas gali paveikti ne tik zondą, bet ir tam tikras skenuojamo bandinio charakteristikas. Kiti mokslininkai irgi atliko panašių tyrimų, bet jų darbuose nagrinėjami klausimai labiau susiję su Magnetinių jėgų mikroskopija (MJM) negu su AJM.

Nepaisant to, jog AFM jutiklio svirtelės dinaminės charakteristikos yra pagrindinis teorinis faktorius, ribojantis AFM greitaveiką, pasitaiko nemažai atvejų, kai standartinių mikroskopų greitaveiką apriboja bandinio pozicionavimo mechanizmo, valdymo algoritmo ar programinės įrangos savybės. Straipsnyje (Kwon *et al.* 2003) aprašoma modifikuota skenavimo mechanizmo konstrukcija. Savo prototipe mokslininkai atskyrė z ašies pozicionavimo mechanizmą nuo x – y ašių pozicionavimo mechanizmo. Patobulintame mikroskope priešingai negu naudojant tradicinę konstrukciją, z ašimi juda ne bandinys, bet zondas. Toks patobulinimas leido padidinti z ašies greitaveiką, z ašies dinaminės charakteristikos tapo nepriklausomomis nuo x ir y ašių charakteristikų, padidėjo skenavimo tikslumas, nes sumažėjo nuosekliai sujungtų judančių mechaninių grandžių, buvo geriau užtikrinamas statmenumas tarp z ir x – y ašių.

Straipsnyje (Bozchalooi *et al.* 2016) aprašomas bandymas sukurti AFM, skirtą didelių paviršių skenavimui ($120\ \mu\text{m} \times 120\ \mu\text{m}$). Norėdami padidinti skenavimo mechanizmo eigas mokslininkai naudojo nuosekliai sujungtus nanomanipulius. Buvo sukurtas mechanizmo dinamiką aprašantis matematinis modelis bei pavarų valdiklis, kuris leido kompensuoti paklaidas, atsirandančias dėl pavarų dinaminis savybių.

Literatūroje pasitaiko daug straipsnių, kuriuose minimalūs pokyčiai mechaninėje sistemoje yra derinami su naujais arba patobulintais AFM valdymo bei vaizdo formavimo algoritmais. Tokie darbai pristatomi šiuose straipsniuose: (Fleming *et al.* 2010, Fairbairn *et al.* 2013, Schitter *et al.* 2008, Schitter *et al.* 2004, Wang *et al.* 2015).

Iš Silicio arba silicio nitrido gaminamos AFM jutiklio svirtelės jau pasiekė savo greitaveikos galimybių ribas, nebegalima pagaminti mažesnių svirtelių, nebėmanoma pasiekti, kad svirtelės turėtų aukštesnius rezonansinius dažnius. Straipsnyje (Adams *et al.* 2016) aprašomi iš polimero SU-8 pagamintų svirtelių

tyrimai. Naujos medžiagos panaudojimas leido sukurti svirtelės, turinčias daug didesnę slopinimo koeficientą, lyginant su vienodos geometrijos svirtelėmis, pagamintomis iš silicio nitrido. Adamso (Adams) ir jo komandos atlikti tyrimai parodė, jog naudojant iš polimero pagamintas svirtelės skenavimo ore greitį dirbant dinaminio kontakto režimu galima padidinti iki 19 kartų, lyginant su analogiškų matmenų svirtelėmis, pagamintomis iš silicio nitrido.

Apibendrinant visus apžvelgtus tyrimus susijusius su AFM greitaveikos didinimu galima teigti, jog yra nustatyti pagrindiniai greitaveiką ribojantis veiksniai, išbandyta daug naujų metodų ir patobulinimų, leidžiančių atskirais atvejais ženkliai didinti greitaveiką, bet kol kas dar nėra pasiūlytas ir išmėgintas universalus metodas, leidžiantis padidinti AFM greitaveiką dirbant kontaktiniu režimu.

1.4. Analizinių-skaitinių atominių jėgų mikroskopo jutiklio tyrimų apžvalga

Nuo pat AFM sukūrimo 1989 metais didelis dėmesys buvo skiriamas AFM svirtelės matematinių modelių kūrimui ir analizei baigtinių elementų metodu. Skirtingi tyrėjai analizuodami svirtelės modelius vertino skirtingus parametrus ir tyrė svirtelės charakteristikas esant įvairioms jutiklio darbo sąlygoms.

Mokslininkai Songas ir Bušanas (Song, Bhushan) atliko didelį darbą siekdami susisteminti su AFM svirtelių tyrimais susietą informaciją. Naudodamiesi anksčiau atliktų tyrimų rezultatais, mokslininkai išskyrė du pagrindinius AFM jutiklių matematinių modelių tipus: modeliai, kuriuose vertinama zondo ir bandinio paviršiaus sąveikos jėga, ir modeliai, kuriuose ši jėga nevertinama. Nagrinėdami stačiakampės svirtelės charakteristikas mokslininkai nustatė keturias pagrindines svirtelės deformacijos formas, naudodami įvairius dinامينius arba baigtinių elementų modelius, užrašė jų judesio lygtis bei aprašė kuriais atvejais, kurios formos pasireiškia labiausiai (Song, Bhushan 2008). Ramanas (Raman) ir jo komanda atliko panašų darbą stengdamiesi susisteminti tyrimus, atliktus nagrinėjant svirtelės dinamiką, kai AFM dirba dinaminio kontakto režimu. Savo straipsnyje mokslininkai nagrinėjo stačiakampių ir trikampių svirtelių virpesių modas. Užrašė svirtelės virpesių lygtį. Aprašė kaip skiriasi svirtelės virpesiai dirbant ore ir skystyje (Raman *et al.* 2008).

Straipsnyje (Martin *et al.* 2008) smulkiai nagrinėjami svirtelės virpesiai skystyje. Tyrėjai modeliavo stačiakampę svirtelę, naudodami vieno laisvės laipsnio dinaminį modelį, kurį papildė Navjė-Stokso lygtimis. Remdamiesi savo sukurtu modeliu mokslininkai nustatė, jog svirtelai virpant skystyje dėl padidėjusio slopinimo mažėja svirtelės virpesių amplitudė ir rezonansinis dažnis. Mokslininkai taip pat nustatė, jog slopinimo padidėjimas smarkiai priklauso nuo skysčio klampos ir

beveik nepriklauso nuo skysčio tankio (Dzedzickis, Bučinskas 2014). Tyrimą panašų į pristatytą straipsnyje (Martin *et al.* 2008) atliko ir kita mokslininkų grupė – Korajemas ir Damirchelis (Korayem, Damircheli). Savo tyrimuose jie panaudojo sudėtingesnę 2 laisvės laipsnių dinaminį modelį, pagrįstą Timošenko strypų teorija. Tai leido vertinti ir trinties jėgos sukeltus sukamuosius svirtelės virpesius. Šie tyrimai nustatė, kaip svirtelės rezonansinis dažnis priklauso nuo skysčio savybių bei nuo geometrinių svirtelės parametrų (Korayem, Damircheli 2014).

Matematinį modelį, pagrįstą Tymošenko strypų teorija savo tyrimuose naudojo ir Klaesenas (Claeyssen) straipsnyje (Claeyssen 2010). Autorius tarpusavyje palygino tiesinį ir netiesinį kontakto tarp zondo ir bandinio paviršiaus modelį, parašė svirtelės virpesių lygtį. Kitame savo straipsnyje (Claeyssen *et al.* 2013) mokslininkas nagrinėjo svirtelių rezonansinius dažnius ir virpesių modas, užrašė virpesių lygtis, tinkančias svirtelėms, padengtoms plonu pjezoelektrinės medžiagos sluoksniu. Rifas (Rifai) savo straipsnyje (Rifai *et al.* 2005) sujungė AFM svirtelės modelį su pjezoelektrinės pavaros modeliu bei įvertino zondo ir bandinio paviršiaus sąveikos jėgas. Tyrėjas nagrinėjo galimybę nano-manipulatoriuose naudoti AFM jutiklių svirtelės valdant jas pjezoelektrinėmis pavaromis.

Mosapuras (Moosapour) su savo komanda nagrinėjo zondo ir bandinio paviršiaus kontakto standumo įtaką svirtelės dinaminėms charakteristikoms (Moosapour *et al.* 2012). Tyrimai sudarė dviejų laisvės laipsnių svirtelės matematinį modelį remdamiesi Oilerio-Bernulio strypų teorija. Kontakto standumą mokslininkai aprašė naudodami tris standumo elementus, kurie prie zondo prijungti statmena, išilgine bei skersine kryptimis. Šis modelis leido įvertinti kontakto standumą trimis kryptimis ir jo įtaką svirtelės rezonansiniams dažniams. Belikovas (Belikov) pateikė patikslintą zondo ir bandinio paviršiaus kontakto modelį. Skirtingai nuo daugumos kitų tyrėjų, mokslininkas kontaktą modeliavo remdamasis ne tik klasikine Herco (Hertz) teorija, bet naudojo kelias Leonardo-Jono (Lennard-Jones) modelio modifikacijas ir Derjagino (Derjaguin) aproksimaciją. Šis modelis leido įvertinti efektus, atsirandančius zondui artėjant bei tolstant nuo bandinio paviršiaus, bei energijos nuostolius, atsirandančius dėl adhezijos (Belikov, Maganov 2011). Salapakas (Salapaka) tyrė AFM jutiklio svirtelės ir zondo dinamiką. Mokslininkas svirtelę modeliavo naudodamas tradicinį vieno laisvės laipsnio masės ir standaus elemento modelį, o zondo ir bandinio paviršiaus sąveiką aprašė naudodamas Jonsono-Kendelo-Robertso (Johnson-Kendall-Roberts) teoriją, apibūdinančią tamprų kontaktą (Salapaka, Dahleh 2000). Daenabis (Daeinabi, Korayem 2011) savo darbe tarpusavyje palygino kelis modelius, aprašančius zondo ir bandinio paviršiaus tarpusavio sąveikos jėgas. Tyrimai taip pat įvertino zondo viršūnės formos įtaką svirtelės charakteristikoms ir pateikė rekomendacijas, kokios formos zondai geriausiai tinka įvairaus kietumo medžiagoms.

Salgaras (Salgar) nagrinėjo svirtelės rezonansinius dažnius mikroskopui dirbant kontaktiniu režimu. Svirtelę mokslininkas aprašė naudodamas vieno laisvės

laipsnio dinaminį modelį. Zondo ir paviršiaus sąveikos jėgas tyrėjas įvertino naudodamas Leonardo-Jono modelį, kuris aprašo atskirų atomų arba molekulių tarpusavio sąveikos jėgas (Salgar, Srinivas 2012). Panašus darbas pristatomas ir Sebastiano (Sebastian) straipsnyje (Sebastian *et al.* 1999). Tyrėjai taip pat nagrinėjo dinaminio kontakto režimu veikiančio AFM jutiklio dinamiką, bet priešingai nei jų kolegos, zondo ir bandinio paviršiaus sąveiką užrašė kaip dalimis tiesinę funkciją. Savo sukurto modelio adekvatumą mokslininkai patvirtino eksperimentinių tyrimų rezultatais.

Vazkezas (Vazquez) pateikė supaprastintą svirtelės modelį ir sudarė AFM jutiklio svirtelės perdavimo funkciją. Šios funkcijos įėjimo parametrai yra zondą veikianti prisilietimo jėga bei jėga, veikianti išilgine svirtelės kryptimi, o išėjimo parametrai yra zondo pozicija ir zondo polinkio kampas (Vazquez *et al.* 2006).

Abasis (Abbasi) pristatė AFM jutiklio svirtelės matematinį modelį, kuris leido įvertinti tokius veiksnius, kurie kitų autorių darbuose buvo nevertinami arba vertinami apytiksliai. Pasiūlytas modelis leido įvertinti tokius veiksnius kaip: zondo inercijos momentas, pradinis svirtelės kampas skenuojamo paviršiaus atžvilgiu, zondo atstumas nuo svirtelės galo (Abbasi, Mohammadi 2010).

Mokslininkai Zhou ir Fangas (Zhou, Fang) Matlab/Simulink sistemoje sukūrė virtualų dinaminio kontakto režimu veikiančio AFM modelį. Šis modelis leido atlikti tokius virtualius eksperimentus kaip: zondo priartėjimo ir atsitraukimo nuo paviršiaus tyrimai, svirtelės virpesių žadinimo sistemos tyrimai, svirtelės virpesių amplitudės valdymo sistemos tyrimai (Zhou, Fang 2006).

Stemmeris (Stemmer) sukūrė matematinį AFM jutiklio modelį, kurį siūlė naudoti tobulinant AFM valdymo sistemą, mažinant paklaidų atsiradimo tikimybę. Stemmerio sukurtas modelis vertina ne tik svirtelės dinamiką, bet ir seka bandinio paviršiaus pokyčio istoriją, modelis vertina jau nuskenuotos eilutės geometriją ir prognozuoja svirtelės poslinkius skenuojant naują eilutę (Stemmer *et al.* 2004).

Saderis (Sader) nagrinėjo metodą, kuris leido trikampes (sujungtus trikampių du strypelius) svirtelės aproksimuoti dviem lygiagrečiais tarpusavyje sujungtais strypais. Mokslininkas nustatė, jog tinkamai parinkus geometrinius strypų parametrus toks aproksimavimo metodas leidžia aprašyti trikampių svirtelių virpesius 2 % tikslumu (Sader 1995). Nepaisant pasiekto aukšto tikslumo šis aproksimacijos metodas nėra dažnai naudojamas, o kai reikia modeliuoti trikampes AFM svirtelės, daugelis tyrėjų yra linkę naudoti baigtinių elementų metodus. Baigtinių elementų metodai leidžia paprasčiau įvertinti sudėtingą svirtelės geometriją.

Straipsnyje (Muller *et al.* 2006) pateikiamas parametrinis trikampės AFM jutiklio svirtelės baigtinių elementų modelis. Tyrėjai išbandė savo modelį su keliomis skirtingo standumo dažniausiai naudojamomis svirtelėmis ir nustatė, kad sukurta modelis yra tinkamas naudoti, nagrinėjant deformacijas tam tikruose

ribose. Šis modelis geriausiai aprašo atvejus, kai zondo viršūnės poslinkiai neviršija 100 nm normaline ir 10 nm skersine kryptimi. Panašus darbas yra pristatomas ir (Choi, Gethin 2009). Tyrėjai, naudodami baigtinių elementų AFM svirtelės modelį, simulavo skenavimo procesą ir nagrinėjo svirtelės dinaminį atsaką į žadinimą skersine ir normaline kryptimis. Savo darbe Choi (Choi) simulavo skenavimo procesą naudodamas trikampes ir stačiakampes svirtelės. Straipsnyje (Espinoza-Beltran *et al.* 2009) taip pat pristatomas AFM jutiklio svirtelės baigtinių elementų modelis, kuris naudojamas svirtelės dinaminėms charakteristikoms tirti. Pagrindinis šio modelio skirtumas nuo aprašytų ankščiau yra toks, kad čia yra vertinama silicio nitrido kristalų forma bei orientacija, taip pat yra užsiduodama, jog svirtelės skerspjūvis yra ne stačiakampio, bet trapecijos formos. Baigtinių elementų metodas buvo taikomas AFM jutiklio charakteristikoms tirti, kai mikroskopas veikė dinaminio kontakto režimu. Tyrėjas nustatė svirtelės rezonansinio dažnio priklausomybes nuo svirtelės geometrinės formos ir bandinio paviršiaus kietumo (Arinero, Leveque 2003). Songas ir Bušanas (Song, Bhushan), naudodami baigtinių elementų modelius, tyrinėjo svirtelės dinaminį parametrų priklausomybes nuo įvairių veiksnių. Straipsnyje (Song, Bhushan 2006) tyrėjai nagrinėjo pagrindines svirtelės virpesių modas bei apžvelgė matematinius modelius, aprašančius sąveikos jėgas tarp zondo ir bandinio paviršiaus. Straipsnyje (Song, Bhushan 2007) tyrėjai įvertino, kaip keičiasi AFM jutiklio svirtelės rezonansinis dažnis skenuojant ore ir skystyje.

Daug mokslininkų savo darbuose nagrinėjo AFM jutiklio zondo nusidėvėjimo klausimus, vieni tyrėjai, nagrinėdami dilimo procesus, nagrinėjo medžiagos savybes, kiti mėgino surasti priklausomybes tarp zondo dilimo greičio ir svirtelės dinaminį charakteristikų bei AFM skenavimo greičio ir zondo bei bandinio paviršiaus sąveikos jėgos. Straipsnyje (Chung *et al.* 2005) nagrinėjamas zondo dilimas AFM dirbant kontaktiniu režimu. Mokslininkai savo tyrime įvertino silicio (Si) bei silicio oksido (SiO_2) kristalų savybes ir nustatė, jog daugeliu atveju zondo viršūnė yra pažeidžiama pirmojo prisilietimo prie ruošinio metu. Atlikę keletą tyrimų mokslininkai pateikė rekomendacijas, jog siekiant išvengti zondo pažeidimų pirmo prisilietimo prie bandinio metu, prisilietimo metu jėgos pokytis neturėtų būti didesnis negu 0,1 nN/s. Kolakas (Colac) ir Degiampietras (Degiampietro) savo darbuose nanolygmenyje nagrinėjo abrazyvinio dilimo procesą tarp nerūdijančiojo plieno ir deimantinio AFM zondo (Colac 2009, Degiampietro, Colac 2007). Straipsnyje (Khurshudov *et al.* 1997) nagrinėjamas dilimo procesas tarp silicio kristalų ir deimantinio AFM zondo. Straipsnyje (Bloo *et al.* 1999) aprašomas AFM jutiklio zondo viršūnės deformacijos ir dilimo procesas.

Apibendrinta informacija aprašanti AFM zondo dilimo procesus pateikta (Chung 2014). Straipsnyje apžvelgtos įvairių zondu dilimo charakteristikos, apžvelgti zondo dilimo įvertinimo metodai, aprašyti egzistuojantys zondo nusidėvėjimo matematiniai modeliai.

Apibendrinus atliktus mokslinius tyrimus galima teigti, jog yra atlikta daug tyrimų įvertinant atskirus AFM skenavimo greitį ir tikslumą įtakojančius veiksnius, bet nėra atlikta tyrimų, vertinančių šių veiksnių visumą. Taip pat nepavyko rasti universalios AFM jutiklio matematinio modelio, leidžiančio simuliuoti įvairių paviršių skenavimą skirtingais greičiais.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus literatūros analizę, galima daryti šias išvadas:

1. Remiantis atlikta AFM greitaveikos didinimo metodų analize ir siekiant pagrįsti naujai siūlomo AFM greitaveikos didinimo metodo strateginius sprendimus, buvo sukurtas AFM jutiklio dinaminių charakteristikų valdymo metodas. Metodas yra paremtas papildomų valdomo standumo elementų įdiegimu į jau egzistuojančią dinaminę sistemą. Dėl mažų mechaninės struktūros matmenų naudojamas bekontaktis metodas, AFM jutiklio mechaninė struktūra yra veikama suspausto oro srovės. Priklausomai nuo oro slėgio kinta bendras svirtelės standumas bei rezonansinis virpesių dažnis.
2. Mokslinėse publikacijose, aprašančiose AFM greitaveikos didinimo metodus, daug dėmesio yra skiriama svirtelės ir zondo geometriniams parametrams, svirtelių medžiagoms, AFM valdymo bei vaizdų formavimo algoritams. Remiantis atlikta literatūros analize galima teigti, jog pagrindinis veiksnys, ribojantis AFM greitaveiką, yra AFM jutiklio dinaminės charakteristikos.
3. Atlikus AFM jutiklio analizinių-skaitinių tyrimų apžvalgą nustatyta, kad daugiausiai dėmesio yra skiriama svirtelės virpesių modeliavimui, kai AFM dirba dinaminio kontakto režimu. Nemažai mokslininkų nagrinėja įvairių aplinkos parametrų įtaką svirtelės dinaminėms charakteristikoms bei eksperimentiniams tyrimams, reikalingiems pagrįsti sukurtais matematiniais modeliais.
4. Kitų autorių publikacijose išanalizuoti įvairūs AFM greitaveikos didinimo metodai nėra universalūs, greitaveika yra padidinama tik specifiniais atvejais ir dažniausiai tam reikia smarkiai modifikuoti jau turimus AFM arba naudoti svirtelės, turinčias reikiamas charakteristikas. Kol kas dar nėra pasiūlyta universalios metodo, kuris leistų padidinti AFM greitaveiką, smarkiai nekeičiant jau esančių AFM konstrukcijos

bei nereikalautų kiekvienam atvejui gaminti svirteles su specifinėmis charakteristikomis.

Įvertinus mokslinėje literatūroje išnagrinėtus klausimus ir atsižvelgiant į disertacijos darbo tikslą yra tikslinga išspręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti AFM jutiklių tyrimų mokslinės literatūros apžvalgą, nustatyti pagrindinius AFM greitaveiką ribojančius veiksnius.
2. Sudaryti matematinį aerodinaminės jėgos poveikiu valdomo AFM jutiklio modelį.
3. Ištirti ir įvertinti modifikuoto AFM jutiklio tinkamumą tirti įvairių medžiagų paviršiaus struktūrą padidintais greičiais.
4. Sukurti tyrimų standą, skirtą AFM jutiklio charakteristikoms įvertinti.
5. Įvertinti AFM tikslumą, naudojant modifikuotą jutiklį, palyginus nuskenuoto etaloninio paviršiaus formą su gamintojo deklaruojama paviršiaus forma.

Atominių jėgų mikroskopo jutiklio analiziniai-skaitiniai tyrimai

Šiame skyriuje pateikti kinematiškai žadinamos AFM jutiklio mechaninės struktūros virpesių tyrimo rezultatai gauti analiziniu-skaitiniu metodu. Šių savybių tyrimo rezultatai yra būtini siekiant įrodyti siūlomo AFM greitaveikos didinimo metodo efektyvumą. Taip pat yra pateiktas Baigtinių elementų (BE) metodu sudarytas AFM svirtelės modelis, nustatyta svirtelės laisvojo galo poslinkio priklausomybė nuo atstumo tarp svirtelės paviršiaus ir ortakio galo. Skyriaus tematika yra paskelbti keturi straipsniai (Dzedzickis *et al.* 2015, Bučinskas *et al.* 2016, Bučinskas *et al.* 2017, Dzedzickis *et al.* 2018).

2.1. Atominių jėgų mikroskopo jutiklio tikslumo teorinių tyrimų metodika

Mokslinėje praktikoje yra žinomi ir seniai naudojami įvairūs metodai skirti teoriškai nustatyti dinaminės sistemos savybes, tačiau nepaisant daugelio atliktų AFM jutiklio mechaninės struktūros tyrimų, AFM jutiklio dinaminių charakteristikų tyrimas vis dar išlieka aktualus. Literatūroje dažniausiai yra pateikiami modeliai (Song, Bhushan 2008, Chang *et al.* 2005, Caruntu 2009, Kim *et al.* 2012,

Raman *et al.* 2008, Moosapour *et al.* 2012, Salgar, Srinivas 2012, Bahrami, Abeygunawardana 2018, Coskun *et al.* 2018), kuriuose svirtelė yra aproksimuojama tampriais elementais ir aprašoma lygtimis su dalinėmis išvestinėmis. Šie modeliai dažniausiai būna vieno ar dviejų laisvės laipsnių, juose pateikiami sunkiai realizuojami sprendiniai arba taikomos hipotezės, kurios veikia labai specifinėmis sąlygomis arba reikalauja papildomų eksperimentinių tyrimų.

Siekiant įvertinti Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros, kaip jautrios dinaminės sistemos, savybes žemiau yra aprašomas metodas, leidžiantis remiantis analitiniais ir skaitmeniais sprendiniais sukurti tinkamą AFM jutiklio mechaninės struktūros modelį bei įvertinti siūlomo AFM greitaveikos didinimo metodo efektyvumą. Pasiūlytas metodas buvo patikrintas eksperimentiniais tyrimais.

Pirma, buvo atlikti teoriniai aerodinaminės jėgos tyrimai, naudojant stačiakampę svirtelę, kurios ilgis 220 μm , plotis 50 μm , storis 0,5 μm ir ortakį, kurio kiauromės skersmuo 0,2 mm (2.6 pav.). Tyrime buvo nustatytos priklausomybės tarp svirtelės laisvojo galo poslinkio ir atstumo nuo svirtelės paviršiaus iki ortakio galo, veikiant svirtelę skirtingomis suspaustomis dujomis. Detali metodika ir tyrimo rezultatai pateikiami 2.2 poskyryje. Nustatytos priklausomybės naudojamos tolimesniuose tyrimuose.

Antra, buvo atlikti statiniai eksperimentiniai tyrimai ir nustatytos priklausomybės tarp zondo poslinkio ir tiekiamo suspausto oro slėgio. Buvo nustatyta, jog egzistuoja slėgio riba, kurią viršijus suspaustas oras pradeda formuoti priešingos krypties jėgą tarp bandinio paviršiaus ir svirtelės apatinio paviršiaus, todėl bendras svirtelės poslinkis sumažėja. Šio tyrimo metodika ir rezultatai yra pateikti 3.3 poskyryje.

Trečia, įvertinus pradinių tyrimų duomenis, tolimesniuose tyrimuose nuspręsta naudoti 0,4 mm skersmens ortakį, o aerodinaminės jėgos sukūrimui naudoti suspausto oro srautą. Atlikti papildomi aerodinaminės jėgos tyrimai, naudojant realių matmenų trimatį AFM svirtelės ir suprojektuoto laikiklio modelį, buvo nustatytos priklausomybės tarp svirtelės poslinkio ir atstumo nuo viršutinio paviršiaus iki ortakio galo, esant skirtingam suspausto oro slėgiui. Nustatytos priklausomybės naudojamos matematiname modelyje vertinant netiesinį aerodinaminės jėgos poveikį svirtelės charakteristikoms. Šio tyrimo metodika ir rezultatai yra pateikti 2 skyriuje.

Ketvirta, atlikti modifikuoto AFM jutiklio teoriniai tyrimai simuliuojant situacijas, kai skirtingais greičiais skenuojami specialiai šiems tyrimams pagaminti žinomos struktūros bandiniai, naudojant originalų ir modifikuotą AFM jutiklį su skirtingo standumo svirtelėmis. Nustatyta teigiama pasiūlyto greitaveikos metodo didinimo įtaka jutiklio charakteristikoms. Skenuojant 100 nm aukščio periodines struktūras, kurių periodas 2 μm , visais bandytais greičiais teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis pasireiškia suspausto oro slėgiui esant 6–7 kPa, vertinant visus

3 (H , PF , GF) analizuotus parametrus. Detali šio tyrimo metodika ir gauti rezultatai pateikiami 3 skyriuje.

2.2. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio modeliavimas

Įvertinus tai, jog mokslinėje literatūroje pateikti AFM jutiklio mechaninės struktūros matematiniai modeliai nėra tinkami įvertinti siūlomo greitaveikos didinimo metodo efektyvumą, buvo sukurtas naujas sistemos modelis, kuris leis simuliuoti įvairių paviršių skenavimą skirtingais greičiais ir įvairiomis sąlygomis.

Matematinio modelio kūrimas yra sudėtingas procesas, reikalaujantis tikslaus daugelio parametrų ir jų tarpusavio sąveikos įvertinimo. Sprendžiamas uždavinys gali būti užrašytas simboliškai, remiantis bendrąją dinamikos lygtimi:

$$\begin{cases} [A]\{\ddot{q}(t)\} + [B]\{\dot{q}(t)\} + [C]\{q(t)\} = \{Q_{mech}(t)\} + \{Q_{aer}\}, \\ \{Q_{aer}\} = \{f(p, \{q(t)\})\} \end{cases}, \quad (2.1)$$

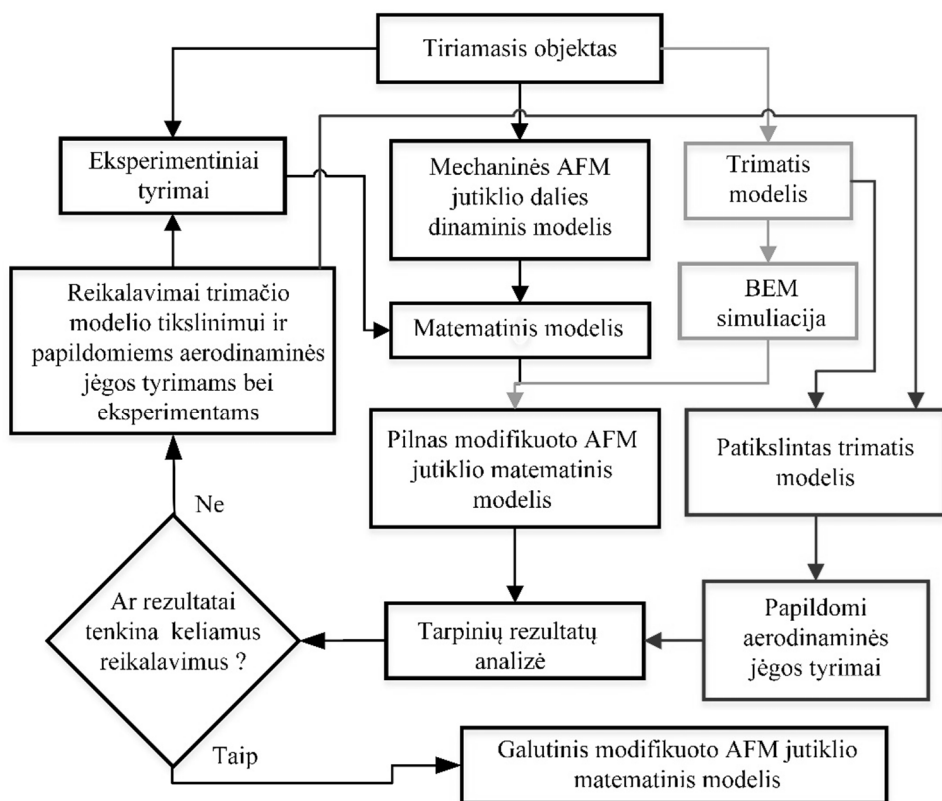
čia $[A]$ – inercijos jėgų matrica; $[B]$ – slopinimo koeficientų matrica; $[C]$ – standumo koeficientų matrica; $\{q\}$ – apibendrintųjų koordinačių ir jų išvestinių vektorius; $\{Q_{mech}\}$ – apibendrintųjų mechaninių jėgų vektorius; $\{Q_{aer}\}$ – apibendrintųjų aerodinaminių jėgų vektorius; p – slėgis.

Nagrinėjamas uždavinys yra suskaidytas į dvi dalis: mechanikos ir aerodinamikos uždavinius, kurios tarpusavyje sieja silpnoji sąsaja (*weak coupling*). Aerodinaminė jėga, kuri kaip netiesinė spyruoklė veikia mechaninę sistemą, yra vertinama kaip mažo greičio laminarinis srautas, nesukeliantis įtakos aplinkiniam oro tūriui dėl tarpusavio trinties reiškinių, nes oro tarpas, tarp vamzdžio išėjimo skerspjuvio ir AFM svirtelės yra labai mažas. AFM svirtelės poslinkis yra daug mažesnis nei oro tarpas, todėl svirtelės paviršiaus priartėjimo įtaka srauto charakteristikoms gali būti laikoma nereikšmingai mažu dydžiu ir nevertinama. Svirtelės įtaka oro srauto valdymo sistemai yra antro laipsnio mažas dydis ir savo modelyje mes jo nevertiname. Tokios modelio sudarymo nuostatos leidžia skaidyti uždavinį į izoliuotas sistemas ir sujungti jas modelyje, naudojant apibendrintąsias koordinates.

Dalis modeliui sudaryti reikalingų parametrų negali būti nustatyti tiesiogiai, reikalingi papildomi teoriniai arba eksperimentiniai tyrimai. Matematinio modifikuoto AFM jutiklio modelio kūrimo procesas schematiškai pavaizduotas 2.1 paveiksle.

Mechaninės AFM jutiklio dalies matematinis modelis kuriamas naudojant (Augustaitis *et al.* 2011) siūlomą metodiką. Modelis kuriamas dviem etapais. Pro-

cesas pradedamas nuo dinaminio modelio (2.2 pav.) sudarymo, kuriame įvertinama įrenginio konstrukcija bei visos sistemą veikiančios jėgos. Pagal dinaminį modelį, naudojant Lagranžo lygtį, sudaroma mechaninę sistemą aprašančių lygčių sistema. Netiesinės aerodinaminės jėgos poveikis modeliuojamai mechaninei sistemai nustatomas BE metodu atliekant dujų srauto tėkmės simuliaciją realių matmenų AFM svirtelės trimačiame modelyje. Modeliavimo rezultatai patikslinami eksperimentiniais tyrimais. Naudojant gautus rezultatus sudaromas pirminis matematinio modelio variantas, kurio rezultatai leidžia suformuoti reikalavimus trimačio modelio tikslinimui, aerodinaminės jėgos tyrimams bei papildomiems eksperimentams.



2.1 pav. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio matematinio modelio kūrimo schema

Fig. 2.1. Process diagram of development of mathematical model of modified atomic force microscope sensor

Remiantis pradiniais eksperimentinių tyrimų bei matematinio modelio rezultatais parenkamas sistemoje naudojamo ortakio skersmuo – 0,4 mm. Parenkamos dujos, kurios bus naudojamos aerodinaminei jėgai sukurti. Trimatis modelis patikslinamas įvertinant sukurto AFM svirtelės laikiklio geometriją bei bandinio paviršiaus struktūrą. Laikiklis projektuojamas atsižvelgiant į jau esančios AFM sistemos keliamus geometrinius apribojimus. Atliekami detalesni aerodinaminės jėgos tyrimai, įvertinantys dalį aerodinaminių nuostolių mažiausio skersmens ortakio dalyje, kurie leidžia nustatyti priklausomybes tarp aerodinaminės jėgos poveikio AFM jutiklio svirtelei, esant skirtingiems atstumams tarp ortakio galo ir svirtelės viršutinio paviršiaus bei naudojant skirtingus suspausto oro slėgius. Naudojant gautus rezultatus sukuriamas galutinis modifikuoto AFM jutiklio matematinis modelis, leidžiantis nagrinėti svirtelės dinamines savybes simuliuojant įvairių bandinių skenavimą skirtingais greičiais.

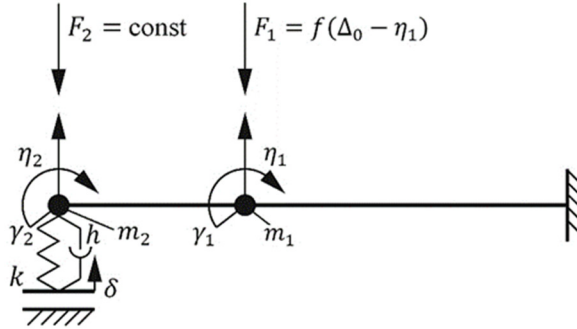
Pagrindinis naujo modelio privalumas, lyginant su literatūroje pateiktais modeliais (Claeyssen *et al.* 2013, Jazi *et al.* 2018, Song, Bhushan 2008, Raman *et al.* 2008, Kuo *et al.* 2011, Claeyssen 2010, Rifai *et al.* 2005, Namvar *et al.* 2018) yra tai, kad modelis leis nustatyti laiko momentą, kada dėl padidėjusio skenavimo greičio yra prarandamas pastovus kontaktas tarp zondo ir bandinio paviršiaus. Taip pat lyginant su pateiktais literatūroje naujai sukurtas modelis yra universalus, jis gali būti naudojamas įvairių matmenų stačiakampiams AFM svirtelėms modeliuoti. Taip pat šiek tiek modifikuotas modelis gali būti taikomas modeliuojant atvejus, kai AFM svirtelę bandoma paveikti įvairios fizikinės prigimties jėgomis arba išjungus papildomos jėgos poveikį gali būti simuliuojamas tradicinio AFM jutiklio veikimas.

Detalesniam matematinio modelio sudarymas aprašomas toliau esančiose skyriuose.

2.2.1. Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros modeliavimas

Šiame skyriuje yra pateikiamas universalus matematinis modelis skirtas nagrinėti stačiakampių AFM jutiklio svirtelių charakteristikas.

Jutiklio svirtelė yra laikoma stačiakampio skerspjūvio strypu ir yra aproksimuojama dviem tampriaisiais elementais su koncentruotomis masėmis galuose. Aproksimacija daroma remiantis metodika, pateikta (Lourier 1961). Yra laikoma, jog kiekvienas tamprusis elementas turi savo masę ir inercijos momentą. Pagal (Augustaitis *et al.* 2011) yra priimama hipotezė, jog modelis nepraranda savo adekvatumo, jei koncentruota masė strypo gale sudaro apie 25,5 % viso strypo masės. Inercijos momentai yra vertinami įtvirtinto strypo galo atžvilgiu. AFM jutiklio dinaminis modelis yra pavaizduotas 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros dinaminis modelis (Dzedzickis *et al.* 2015)

Fig. 2.2. Dynamic model of mechanical structure of atomic force microscope sensor (Dzedzickis *et al.* 2015)

Pagrindinės sistemos koordinatės yra η_1 , γ_1 , η_2 , γ_2 . Pradinė zondo ir bandinio įveržimo jėga aprašoma pastovaus dydžio jėga F_2 , veikiančia neigiamą koordinatės η_2 kryptimi. Papildomos aerodinaminės jėgos poveikis aprašomas netiesine jėga F_1 , ši jėga sumažina tikimybę, kad kontaktas tarp zondo ir paviršiaus bus nestabilus.

Aerodinaminės jėgos poveikis modelyje aprašomas kaip veikiančios jėgos priklausomybė nuo atstumo tarp svirtelės paviršiaus ir ortakio galo:

$$F_1 = f(\Delta_0 - \eta_1), \quad (2.2)$$

čia f – svirtelės paviršiuje veikianti aerodinaminė jėga; Δ_0 – pradinis tarpelio tarp svirtelės paviršiaus ir ortakio galo dydis.

Yra laikoma, jog nagrinėjamą sistemą kinematiškai žadina bandinio paviršiaus šiurkštumas (Zhang, Zhao 2007; Dzedzickis *et al.* 2015). Žadinimo poveikis yra aprašomas koordinate δ . Skenuojantis zondas aproksimuojamas tampriu elementu, kurio standumo koeficientas k ir slopinimo koeficientas h . Toks metodas, skirtas zondo ir bandinio paviršiaus sąveikai aprašyti, naudojamas pakankamai dažnai (Chang *et al.* 2003, Turner, Wiehn 2001, Claeysen *et al.* 2013, Mazeran Loubet 1999, Kahrobaiya *et al.* 2011). Svirtelės tamprumas apskaičiuojamas naudojant skerspjūvio parametrus E , I_{sk} , kur E – tamprumo modulis, I_{sk} – skerspjūvio inercijos momentas horizontalios ašies atžvilgiu. Priimama prielaida, kad sukamieji svirtelės poslinkiai yra maži ir gali būti nevertinami.

Matematinis modelis yra sudarytas remiantis antrojo tipo Lagranžo lygtimi, matricinėje formoje.

$$[A]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + [C]\{q\} = \{Q\}, \quad (2.3)$$

čia $[A]$ – inercijos jėgų matrica; $[B]$ – slopinimo koeficientų matrica; $[C]$ – standumo koeficientų matrica; $\{q\} = \{\eta_1, \gamma_1, \eta_2, \gamma_2\}^T$ – apibendrintųjų koordinačių vektorius; $\{Q\}$ – apibendrintųjų jėgų vektorius.

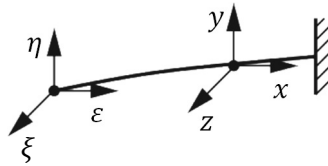
Sistemos kinetinė energija užrašoma kaip:

$$T = \frac{1}{2} (m_1 \dot{\eta}_1^2 + I_1 \dot{\gamma}_1^2 + m_2 \dot{\eta}_2^2 + I_2 \dot{\gamma}_2^2). \quad (2.4)$$

Išdiferencijavus gaunama inercijos matrica:

$$[A] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_2 \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

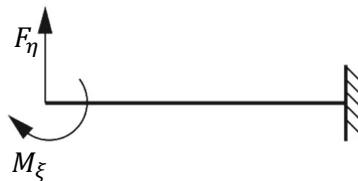
Potencinė sistemos energija randama remiantis metodika aprašyta (Lourier 1961). Lokalias strypų koordinatės naudojamos potencinės energijos apskaičiavimui pavaizduotos 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Lokalias strypų koordinatės naudojamos potencinės energijos apskaičiavimui (Dzedzickis *et al.* 2015)

Fig. 2.3. Local coordinates of the beam for potential energy evaluation (Dzedzickis *et al.* 2015)

Vertinant strypo potencinę energiją priimama prielaida, kad strypas yra tiesialinijinis, natūralios būklės ir jo lenkimas vyksta tik vienoje plokštumoje, kaip pavaizduota 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Lokalias strypo koordinatės (Dzedzickis *et al.* 2015)

Fig. 2.4. Local generalized coordinates of the beam (Dzedzickis *et al.* 2015)

Tuomet strypo potencinė energija pagal (Lourier 1961) yra:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{(M_\xi - sF_\eta)^2}{EI_{sk}} ds, \quad (2.6)$$

čia L – strypo ilgis; s – lokali strypo išilginė koordinatė. Šiuo atveju apibendrintomis koordinatėmis tokiom strypui laikomos jėga F_η ir lenkimo momentas M_ξ .

Išdiferencijavus pagal apibendrintas koordinates F_η ir M_ξ gaunama strypo pasklaidymo matrica:

$$[\beta] = \begin{bmatrix} \frac{L^3}{3EI_{sk}} & -\frac{L^2}{2EI_{sk}} \\ -\frac{L^2}{2EI_{sk}} & \frac{L}{EI_{sk}} \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Standumo matrica yra lygi:

$$[C_{stiff}] = [\beta]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{12EI_{sk}}{L^3} & \frac{6EI_{sk}}{L^2} \\ \frac{6EI_{sk}}{L^2} & \frac{4EI_{sk}}{L} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Modeliuojamą sistemą sudaro du strypai, i-tajam elementui standumo matrica užrašoma:

$$[C_{stiff_i}] = \begin{bmatrix} \frac{12EI_{sk}}{L_i^3} & \frac{6EI_{sk}}{L_i^2} \\ \frac{6EI_{sk}}{L_i^2} & \frac{4EI_{sk}}{L_i} \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Nagrinėjamu atveju abiejų strypų inercijos momentai ir tamprumo moduliai yra lygūs.

Svirtelės potencinė energija:

$$\Pi_{Can} = \sum_{i=1}^2 \Pi_i = \Pi_1 + \Pi_2, \quad (2.10)$$

čia Π_i i -tojo strypo elemento potencinė energija.

Pirmojo strypo potencinė energija:

$$\Pi_1 = \frac{1}{2} [\eta_1; \gamma_1] [C_{stiff_1}] \begin{Bmatrix} \eta_1 \\ \gamma_1 \end{Bmatrix}. \quad (2.11)$$

Antrojo strypo potencinė energija:

$$\Pi_2 = \frac{1}{2} [(\eta_2 - \eta_1); (\gamma_2 - \gamma_1)] [C_{stiff_2}] \begin{Bmatrix} \eta_2 - \eta_1 \\ \gamma_2 - \gamma_1 \end{Bmatrix}. \quad (2.12)$$

Bendra svirtelės potencinė energija:

$$\Pi = \Pi_{Can} + \Pi_3, \quad (2.13)$$

čia Π_3 – potencinė zondo energija:

$$\Pi_3 = \frac{1}{2} k (\eta_2 - \delta)^2. \quad (2.14)$$

Koeficientas k yra dalimis tiesinis siekiant įvertinti matavimo metu vykstančius procesus: kai spyruoklė yra suspaudžiama $k = k_0$, kai spyruoklė nėra suspausta $k = 0$. Tokiu atveju gaunamos dvi sistemos būsenos, vienos sistemos būsenos standumo koeficientas gaunamas išdiferencijavus Π pagal apibendrintąsias koordinates $\eta_1, \gamma_1, \eta_2, \gamma_2$:

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{24EI_{sk}}{L_1^3} + \frac{24EI_{sk}}{L_2^3} & \frac{12EI_{sk}}{L_1^2} + \frac{12EI_{sk}}{L_2^2} & -\frac{24EI_{sk}}{L_2^2} & -\frac{12EI_{sk}}{L_2^2} \\ \frac{12EI_{sk}}{L_1^2} + \frac{12EI_{sk}}{L_2^2} & \frac{8EI_{sk}}{L_1} + \frac{8EI_{sk}}{L_2} & -\frac{12EI_{sk}}{L_2^2} & -\frac{8EI_{sk}}{L_2} \\ -\frac{24EI_{sk}}{L_2^3} & -\frac{12EI_{sk}}{L_2^2} & k + \frac{24EI_{sk}}{L_2^3} & \frac{12EI_{sk}}{L_2^2} \\ -\frac{12EI_{sk}}{L_2^2} & -\frac{8EI_{sk}}{L_2} & \frac{12EI_{sk}}{L_2^2} & \frac{8EI_{sk}}{L_2} \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Kitos būsenos standumo matrica skiriasi tik tuo, kad $k = 0$, tai palengvina tolimesnį sprendimą. Laikoma, kad slopinimo matrica yra lygi:

$$[B] = \alpha [C], \quad (2.16)$$

čia α – nekintantis koeficientas, kurio reikšmė šiuo atveju priimama 0,0009 remiantis (Augustaitis *et al.* 2011; Moosapour *et al.* 2012; Salgar, Srinivas 2012).

Apibendrintųjų jėgų vektorius:

$$\{Q\} = \begin{Bmatrix} -F_1 \\ 0 \\ -F_2 + k\delta + h\dot{\delta} \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (2.17)$$

Tolimesniems skaičiavimams įvedamas diferencijavimo operatorius:

$$s = \frac{d}{dt}. \quad (2.18)$$

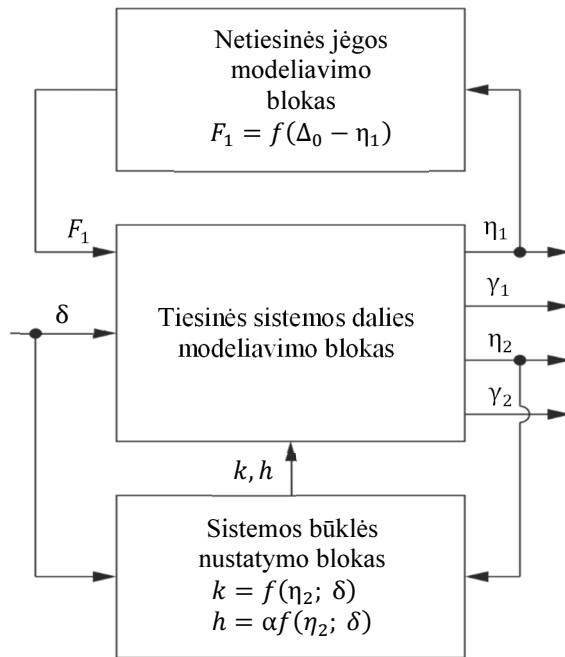
Anksčiau gautos lygtys [A], [B], [C] ir vektorius {Q} užrašomi operatorine forma vienai sistemos būsenai:

$$\begin{cases} m_1 s^2 \eta_1 + B_{11} s \eta_1 + B_{12} s \gamma_1 + B_{13} s \eta_2 + B_{14} s \gamma_2 + C_{11} \eta_1 + C_{12} \gamma_1 + \\ + C_{13} \eta_2 + C_{14} \gamma_2 = -F_1; \\ I_1 s^2 \gamma_1 + B_{21} s \eta_1 + B_{22} s \gamma_1 + B_{23} s \eta_2 + B_{24} s \gamma_2 + C_{21} \eta_1 + C_{22} \gamma_2 + \\ + C_{23} \eta_2 + C_{24} \gamma_2 = 0; \\ m_2 s^2 \eta_2 + B_{31} s \eta_1 + B_{32} s \gamma_1 + \alpha \left(\frac{24 E I_{sk}}{L_2^3} \right) s \eta_2 + h s \eta_2 + B_{34} s \gamma_2 + \\ + C_{31} \eta_1 + C_{32} \gamma_1 + \left(\frac{24 E I_{sk}}{L_2^3} \right) \eta_2 + k \eta_2 + C_{34} \gamma_2 = -F_2 + k \delta + h \dot{\delta}; \\ I_2 s^2 \gamma_2 + B_{41} s \eta_1 + B_{42} s \gamma_1 + B_{43} s \eta_2 + B_{44} s \gamma_2 + C_{41} \eta_1 + C_{42} \gamma_2 + \\ + C_{43} \eta_2 + C_{44} \gamma_2 = 0. \end{cases} \quad (2.19)$$

čia $h = \alpha k$. Sistemai esant kitoje būklėje gautos lygtys skiriasi tuo, kad $k = 0$; $h = 0$. Gautos lygtys išsprendžiamos atitinkamų koordinačių atžvilgiu, įvertinus, kad $k = f(\eta_2; \delta)$ ir $F_1 = f(\Delta_0 - \eta_1)$.

Gautos matematinės lygtys yra sprendžiamos naudojant MatLab/Simulink programinę įrangą. Supaprastinta struktūrinė Simulink schema pateikiama 2.5 paveiksle.

Iš 2.5 paveiksle pateiktos schemos matome, kad modifikuoto AFM jutiklio dinaminis modelis suskirstytas į tris blokus. Netiesinės aerodinaminės jėgos modeliavimo blokas aprašo papildomai pridamos jėgos poveikį, kurio dydis priklauso nuo atstumo tarp svirtelės viršutinio paviršiaus ir ortakio galo. Tiesinės sistemos dalies modeliavimo blokas aprašo svirtelės kaip tiesinės dinaminės sistemos charakteristikas. Kaip jau buvo minėta anksčiau, kontakto standumas ir slopinimas yra modeliuojami kaip dalimis netiesiniai elementai t. y. kontakto standumas ir slopinimas pilyginami nuliui, kai svirtelės judėjimo dėsnis atitinka atšokimo sąlygas, kitais atvejais kontakto standumas ir slopinimas priklauso nuo bandinio medžiagos bei zondo viršūnės apvalinimo spindulio. Nagrinėjamame modelyje už tinkamą kontakto standumo ir slopinimo reikšmės nustatymą atsako sistemos būklės nustatymo blokas.



2.5 pav. Supaprastinta matematinio modelio Simulink schema, δ – kinematinio žadinimo koordinatė, $\eta_1, \gamma_1, \eta_2, \gamma_2$ – išėjimo koordinatės (Dzedzickis *et al.* 2015)

Fig. 2.5. Schematic Simulink diagram of mathematical model: δ – coordinate of kinematic excitation, $\eta_1, \gamma_1, \eta_2, \gamma_2$ – output coordinates. (Dzedzickis *et al.* 2015)

Netiesinio aerodinaminės jėgos poveikio įvertinimo procesas detaliau aprašomas tolimesniame poskyryje.

2.2.2. Teoriniai aerodinaminės jėgos poveikio tyrimai

Modifikuotame AFM jutiklyje naudojamas stabilizuojantis netiesinis aerodinaminės jėgos poveikis priklauso nuo: ortakio skersmens ir formos, dujų tipo bei jų slėgio, svirtelės paviršiaus ploto, pradinio atstumo tarp ortakio galo ir svirtelės viršutinio paviršiaus. Matematiniam modelyje aerodinaminės jėgos priklausomybė nuo atstumo tarp ortakio galo ir svirtelės viršutinio paviršiaus yra aprašoma trečios eilės polinomu. Ši priklausomybė buvo nustatyta atlikus papildomus teorinius tyrimus naudojant BE metodą (Dzedzickis *et al.* 2015).

Aerodinaminės jėgos poveikis modeliuojamas naudojant Navje-Stokso lygtis, kurios aprašo skysčio/dujų masės, momento ir energijos priklausomybes. Šias lygtis papildo skysčio būklės lygtys, apibrėžiančios skysčio pobūdį, ir empirinės

priklausomybės nuo skysčio tankio, klampos ir šilumos laidumo. Neelastiniai, ne-Newtono skysčiai vertinami pagal jų dinaminės klampos priklausomybę nuo srauto pasislinkimo greičio ir temperatūros, o suslėgto skysčio įtaka įvertinama kaip jų tankio priklausomybė nuo slėgio (Matsson 2013). Kiekvienas konkretus skysčio tekės uždavinys galutinai aprašomas jo geometrijos, sienelės ir pradinių sąlygų apibrėžimu.

Nagrinėjamu atveju oro srauto tėkmė numatoma naudojant pagal Favre metodiką suvidurkintas Navje-Stokso lygtis, kuriose atsižvelgiama į turbulencijos įtaką srauto parametrų. Šiuo atveju lygtyse įvedamas papildomas narys – vadinamas Reinoldso įtempimas. Siekiant papildyti lygčių sistemą iki nežinomųjų skaičiaus, naudojamos pernešimo lygtys, aprašančios turbulencijos kinetinę energiją ir disipaciją (taikomas k - ε turbulencijos modelis) (Matsson 2013, Kurowski 2013).

Suvidurkintos Navje–Stokso lygtys:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = \frac{\partial \rho}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial \rho}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H,$$

$$H = h + \frac{u^2}{2}, \quad (2.22)$$

čia u – skysčio greitis, ρ – skysčio tankis, S_i – impulso šaltinis, h – šiluminė entalpija, Q_H – šilumos šaltinis, τ_{ij} – klampos šlyties įtempių tenzorius, q_i – difuzinis šilumos srautas.

Klampos šlyties įtempių tenzorius aprašomas:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right). \quad (2.23)$$

Reinoldso įtempių tenzorius:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (2.24)$$

čia δ_{ij} – Kronekerio delta funkcija (ji yra lygi vienetui, kai $i = j$, ir kai netenkinama ši sąlyga lygi nuliui), μ – dinaminės klampos koeficientas, μ_t – turbulentinės

klampos koeficientas, k – turbulencijos kinetinė energija. μ_t ir k lygūs nuliui kai srauto tekėjimas yra laminarinis.

Turbulencijos modelyje k - ε , μ_t apibrėžiama naudojant du pagrindinius turbulencijos parametrus, k – turbulencijos kinetinė energija ir ε – turbulencijos disipacija.

$$\mu_t = [1 - \exp(-0,025 R_y)]^2 \left(1 + \frac{20,5}{R_T} \right) \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, \quad (2.25)$$

čia $R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$; $R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu}$; y – atstumas iki sienelės.

Apibūdinti turbulentinę kinetinę energiją ir sklaidą, naudojamose dvi papildomos pernešimo lygtys:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon, \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k, \quad (2.27)$$

čia S_k ir S_ε aprašomi:

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B, \quad (2.28)$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}, \quad (2.29)$$

čia P_B – turbulencijos generavimas dėl plūdumo jėgų, kuris gali būti užrašomas kaip:

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \quad (2.30)$$

čia g_i – komponento gravitacijos pagreičio komponentė x_i kryptimi. Konstanta $\sigma_B = 0,9$, konstanta $C_B = 1$ kai $P_B > 0$, $C_B = 0$, kai $P_B < 0$, kitu atveju:

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_u} \right)^3, \quad f_2 = 1 - \exp(-R_T^2). \quad (2.31)$$

Konstantos C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε yra nustatomos eksperimentiškai, skaičiaviuose naudojamos tipinės, programinės įrangos gamintojų siūlomos vertės: $C_\mu=0,09$; $C_{\varepsilon 1}=1,44$; $C_{\varepsilon 2}=1,92$; $\sigma_k=1$; $\sigma_\varepsilon=1,3$ (Matsson 2013).

Čia Leviso skaičius = 1, difuzijos šilumos srautas aprašomas (O'Brien 2014):

$$q_1 = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.32)$$

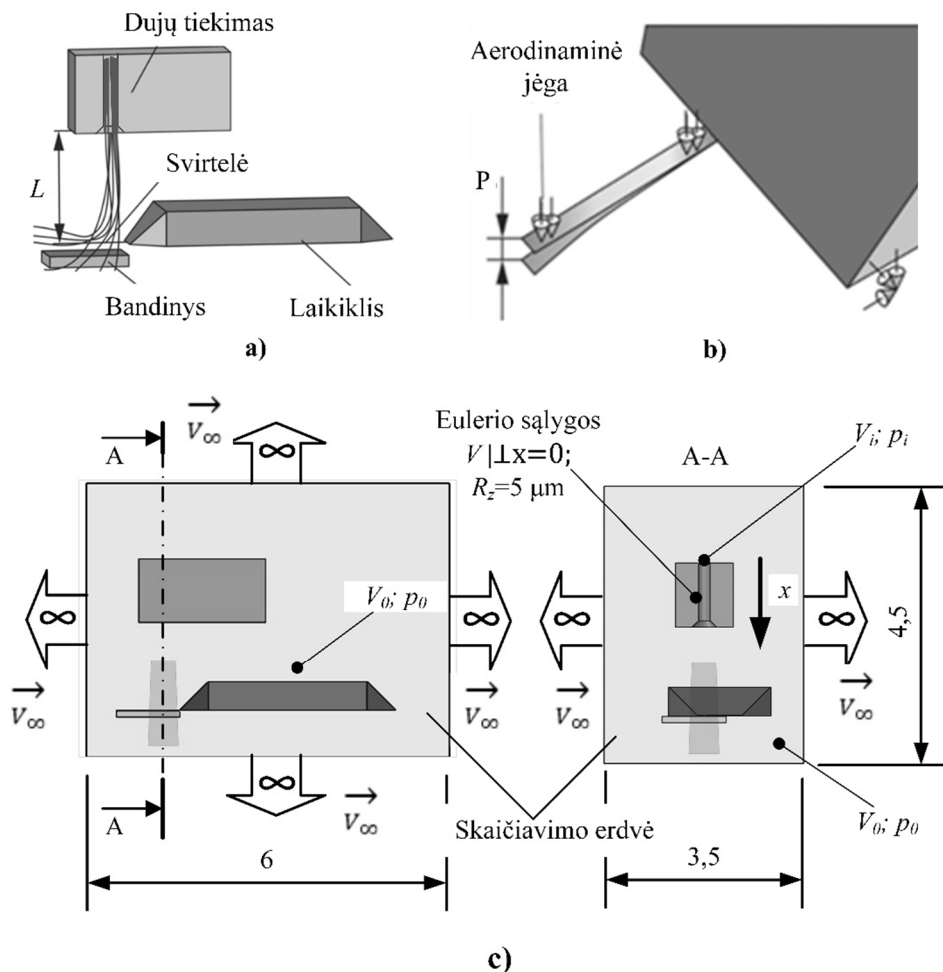
čia konstanta $\sigma_c=0,9$, Pr – Prandtlio skaičius, h – šiluminė entalpija. Šios lygtys apibūdina tiek laminarinius, tiek turbulentinius srautus, leidžia pereiti iš vieno atvejo į kitą ir atgal. Esant laminariniam srautui parametrai k ir μ_t yra lygūs nuliui.

Kraštinės uždavinio sąlygos nustatomos pagal srauto tėkmės pobūdį: jei srautas teka modelio viduje, kraštinės sąlygos aprašomos nurodant įėjimo išėjimo slėgius arba fluideo debitą, jei srautas teka modelio išorėje, kraštinės sąlygos apibrėžiamos aplinkos parametrais. Dažniausiai yra nurodoma: srauto greitis, slėgis, srauto ir aplinkos temperatūra, skysčių mišinio sudėtis ir turbulencijos parametrai (Matsson 2013).

Dujų srauto tėkmės poveikio bei plokštelės lenkimo uždaviniai sprendžiami naudojant programinės įrangos „Solidworks 2017“ paketus „Simulation“ ir „FlowWorks“. Solidworks programinėje aplinkoje yra sukuriama realių matmenų svirtelės ir laikiklio trimatis modelis. Modeliuojama stačiakampė silicio nitrido svirtelė, kurios ilgis 220 μm , plotis 20 μm , storis 0,5 μm , standumas 0,2 N/m, rezonansinis dažnis apie 23 kHz. Bandinys ir ortakis yra modeliuojami supaprastintos formos, primama prielaida, jog dujų srautas yra laminarinis, šiuo atveju nevertinami slėgio nuostoliai ortakyje bei dujų tėkmės efektai, susidarę dėl bandinio paviršiaus geometrijos. Sukurtas simuliacijoje naudojamas trimatis modelis pavaizduotas 2.6 a paveiksle.

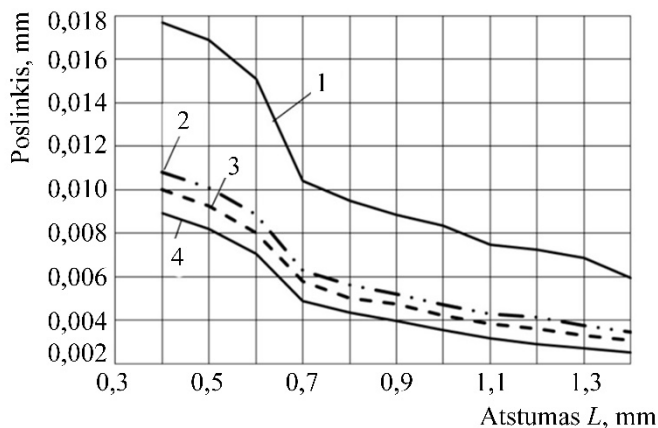
Aerodinaminės jėgos tyrimai atlikti naudojant žemiau pateiktą metodiką. 2.6 a paveiksle pavaizduoto ortakio skersmuo pasirenkamas 0,2 mm. Pagrindinės aerodinaminės jėgos charakteristikos buvo gautos naudojant dujas argoną (Ar), azotą (N_2), orą, anglies dioksidą (CO_2). Suspaustų dujų slėgis pasirenkamas 60 Pa didesnis už atmosferinį slėgį – 101325 Pa (remiantis preliminariais skaičiavimais). Svirtelės laikiklis yra sąlyginai užtvirtinamas kaip pavaizduota 2.6 b paveiksle. Išlaikant anksčiau minėtus dydžius pastoviais yra keičiamas dydis L (2.6 a pav.), atstumas tarp ortakio galo ir svirtelės viršutinio paviršiaus, ribose nuo 0,4 iki 1,4 mm kas 0,1 mm. Aerodinamikos uždavinio kraštinės sąlygos nurodytos 2.6 c paveiksle. Simuliacija atliekama dviem etapais: pirmame etape nustatomas viršutinį svirtelės paviršių veikiantis slėgis naudojant Solidworks programos modulį „Flow simulation“; antrame etape pirmo etapo rezultatas (slėgis ant svirtelės viršutinio paviršiaus) yra perkeliamas į Solidworks deformacijų analizės modulį

„Solidworks simulation“ kaip įėjimo parametras ir apskaičiuojamas svirtelės galo poslinkis P (2.6 b pav.). Skaičiavimai kartojami 4 kartus nagrinėjant skirtingomis savybėmis pasižyminčias dujas. Nustatytos priklausomybės tarp svirtelės poslinkio ir atstumo nuo ortakio galo iki jos viršutinio paviršiaus pateikiamos 2.7 paveiksle.



2.6 pav. Baigtinių elementų simuliacijoje naudojamas modelis a) trimačio modelio komponentai (Dzedzickis *et al.* 2015); b) aerodinaminės jėgos pridėjimo vieta (Dzedzickis *et al.* 2015); c) kraštinės uždavinio sąlygos

Fig. 2.6. Model used in final elements simulation: a) components of the three-dimensional model (Dzedzickis *et al.* 2015), b) place where an aerodynamic load is applied. (Dzedzickis *et al.* 2015); c) boundary conditions of the aerodynamic problem



2.7 pav. Priklausomybės tarp atstumo nuo svirtelės viršutinio paviršiaus iki ortakio galo ir svirtelės poslinkio: 1 – anglies dioksidas; 2 – azoto dujos; 3 – suspaustas oras; 4 – argono dujos (Bučinskas *et al.* 2016)

Fig. 2.7. Dependencies between the distance from the end of the air duct to the upper surface of cantilever and displacement of cantilever: 1 – carbon dioxide; 2 – nitrogen; 3 – compressed air; 4 – argon (Bučinskas *et al.* 2016)

Iš 2.7 paveiksle pateiktų kreivių galima teigti, jog aerodinaminės jėgos poveikis priklauso ne tik nuo geometrinių parametrų ir dujų slėgio, bet ir naudojamų dujų molekulinės masės, tai reiškia, jog siūlomas AFM greitaveikos metodas yra pakankamai lankstus, įvairių dujų naudojimas leidžia reguliuoti aerodinaminės jėgos charakteristikas plačiame diapazone bei taikyti siūlomą metodą laboratorijose, kuriose yra įrengtas centralizuotas vienos ar kitos rūšies dujų tiekimas.

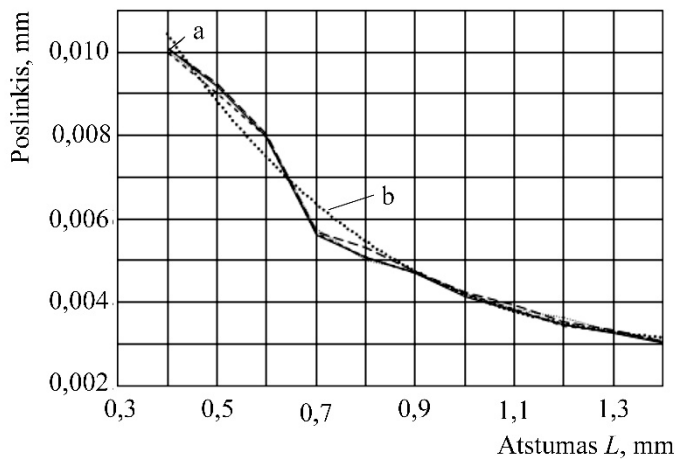
Kad nustatytas priklausomybės būtų galima panaudoti sukurtame matematiname modelyje, jos aproksimuojamos 3 eilės polinomo funkcijomis, kurios bus įrašytos į matematinį modelį. Aproksimavus kreives gautos priklausomybės pateikiamos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Poslinkio P priklausomybės nuo atstumo L, kai naudojami įvairios dujos
Table 2.2. Dependencies of displacement P on distance L, than various gases are used

Eil. nr.	Dujos	Priklausomybė tarp atstumo L ir poslinkio P
1	Anglies dioksidas	$P = -0,0068L^3 + 0,0324L^2 - 0,0522L + 0,0347$
2	Azoto dujos	$P = -0,0037L^3 + 0,0187L^2 - 0,0315L + 0,0211$
3	Suspaustas oras	$P = -0,0039L^3 + 0,0188L^2 - 0,0306L + 0,0199$
4	Argono dujos	$P = -0,0034L^3 + 0,0172L^2 - 0,0284L + 0,0181$

Remiantis 2.7 paveiksle pateiktais rezultatais bei dėl praktinių sumetimų nuspręsta, kad tolimesniuose tyrimuose aerodinaminės jėgos sukūrimui tikslinga naudoti suspausto oro srautą. Toks sprendimas leidžia neprisirišti prie kurioje nors laboratorijoje esančios centralizuotos dujų tiekimo sistemos ir didina siūlomo AFM modifikavimo metodo universalumą. Įvertinus tai, kad sistemoje bus naudojami 0,2–0,6 mm skersmens ortakiai ir reikalingas oro kiekis bei slėgis yra sąlyginai maži, daroma prielaida, jog galima sukurti kompaktišką autonominę sistemą, kuri užtikrintų švaraus suspausto oro tiekimą, palaikant slėgį užduotose ribose.

Įvertinus tai, kad oras yra įvairių dujų mišinys, kuriame yra ir vandens garų, ir naudojant anksčiau pateiktą metodiką yra įvertinti atvejai, kai suspausto oro santykinė drėgmė yra 0 %, 25 %, 50 % ir 75 %. Šis tyrimas atliekamas siekiant išsiaiškinti, kokį poveikį aerodinaminės jėgos efektyvumui turės santykinės oro drėgmės svyravimai ir ar būtina į juos atsižvelgti modeliavimo procese. Simuliacijos rezultatai pateikiami 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Priklausomybės tarp atstumo nuo svirtelės viršutinio paviršiaus iki ortakio galo ir svirtelės poslinkio, kai naudojamas suspaustas oras: a – apskaičiuotų kreivių grupė; b – aproksimacijos kreivė (Bučinskas *et al.* 2016)

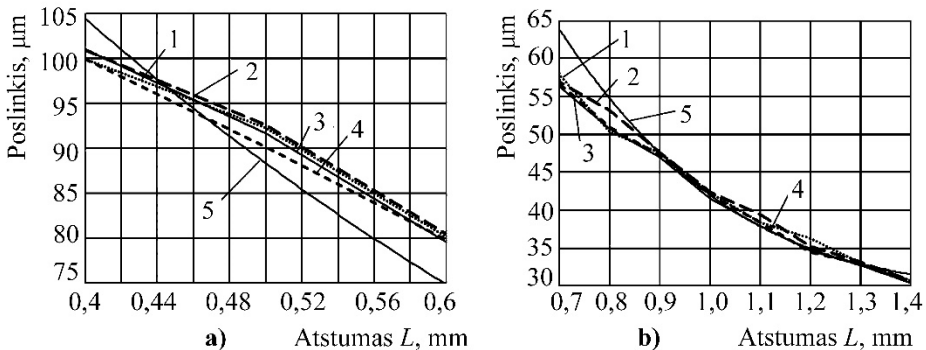
Fig. 2.8. Dependencies between the distance from the end of the air duct to the upper surface of cantilever and displacement of the cantilever, when compressed air is used:

a – set of obtained curves; b – approximation curve (Bučinskas *et al.* 2016)

Iš 2.8 paveikslo matome, kad santykinės oro drėgmės įtaka yra maža visiems simuliacijos rezultatams: kreivė a (2.8 pav.) yra aproksimuojama viena 3 lygio polinomo funkcija b (2.8 pav.). Nežymūs skirtumai tarp priklausomybių, kai nau-

dojamas skirtingo drėgnumo suspaustas oras, yra pastebimi, kai atstumas nuo ortakio galo iki svirtelės viršutinio paviršiaus yra intervaluose nuo 0,4 iki 0,6 mm ir nuo 0,7 iki 1,3 mm. Išryškinti skirtumai pateikiami 2.9 paveiksle.

Iš 2.9 paveikslo matome, kad didžiausi nesutapimai gaunami, kai atstumas L yra 0,5 mm 0,8 mm ir 1,1 mm. Kai atstumas L yra 0,5 mm (2.9 a pav.) iš bendros kreivių grupės išsiskiria kreivė, aprašanti priklausomybę, kai santykinis oro drėgnumas yra 25 %. Šiuo atveju gaunamas apie 0,25 μm mažesnis svirtelės poslinkis. Atstumui esant 0,8 mm (2.8 b pav.), iš bendros grupės išsiskiria kreivė, kai santykinis drėgnumas yra 70 %. Šiuo atveju yra gaunamas apie 0,3 μm didesnis svirtelės poslinkis. Kai atstumas L yra 1,1 mm (2.9 b pav.), esant santykiniam drėgnumui 70 % gaunamas apie 0,1 μm didesnis svirtelės poslinkis. Apibendrinant 2.8 ir 2.9 paveiksluose pateiktus rezultatus galima teigti, jog apčiuopiamą poveikį aerodinaminės jėgos efektyvumui santykinis oro drėgmės lygis sudaro tik esant ribinėms jo vertėms 25 % ir 70 %. Mažai tikėtina, jog tokie santykinės oro drėgmės lygiai galimi patalpose, kur yra naudojami AFM.

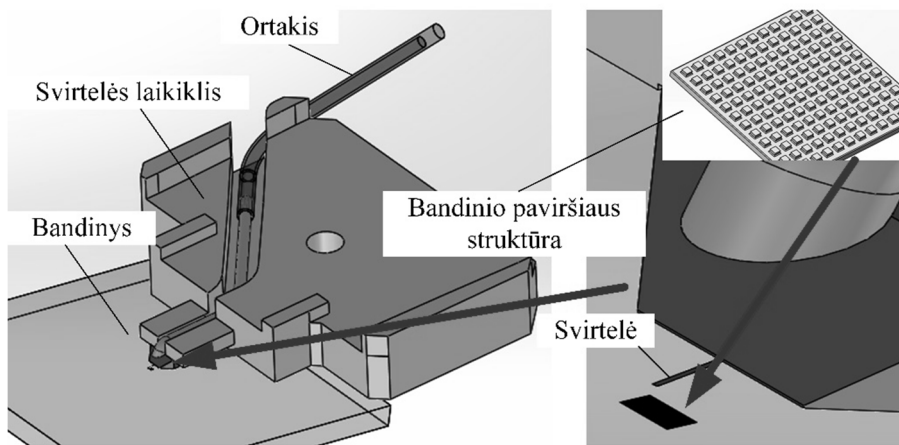


2.9 pav. Santykinės oro drėgmės įtaka svirtelės poslinkiui skirtingose atstumo L ribose: a) atstumas L yra nuo 0,4 iki 0,6 mm; b) atstumas L nuo 0,7 iki 1,3 mm; 1 – santykinis oro drėgnumas 50 %; 2 – santykinis oro drėgnumas 70 %; 3 – santykinis oro drėgnumas 0 %; 4 – santykinis oro drėgnumas 25 %; 5 – aproksimacijos kreivė (Bučinskas *et al.* 2016)

Fig. 2.9. Effect of air humidity to cantilever displacement then distance L is different ranges: a) distance L is in range from 0,4 to 0,6 mm; b) distance L is in range from 0,7 to 1,3 mm; 1 – level of air humidity is 50 %; 2 – level of air humidity is 70 %; 3 – level of air humidity is 0 %; 4 – level of air humidity is 25 %; 5 – approximation curve (Bučinskas *et al.* 2016)

Tolimesniuose teorinių tyrimų eigos etapuose yra priimama prielaida, jog santykinis oro drėgnumas yra apie 50 %. Aerodinaminės jėgos poveikis šiuo atveju aprašomas 2.1 lentelėje pateiktomis priklausomybėmis.

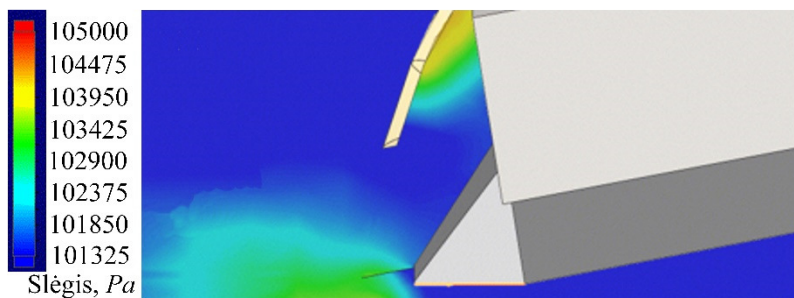
Atlikus pirmuosius praktinius eksperimentus ir gavus pirminius matematinio modeliavimo rezultatus nustatyta, jog yra tikslingiau naudoti 0,4 mm, o ne 0,2 mm skersmens ortakius. Pastebėta, kad didelę įtaką aerodinaminės jėgos efektyvumui turi ortakio forma bei bandinio paviršiaus struktūra ir forma. Taip pat nustatyta, jog norint tiksliau prognozuoti aerodinaminės jėgos poveikį būtina nustatyti analogiškas priklausomybes esant įvairioms slėgio vėrtėms bei įvertinti nors dalį aerodinaminių nuostolių siauriausioje ortakio vietoje. Įvertinus aptartus pastebėjimus sukuriamas patikslintas trimatis modelis, kuris bus naudojamas atliekant skaičiavimus pagal ankščiau aptartą metodiką. Patikslintas modelis pateikiamas 2.10 paveiksle.



2.10 pav. Patikslintas trimatis atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio modelis
Fig. 2.10. Refined three-dimensional model of modified atomic force microscope sensor

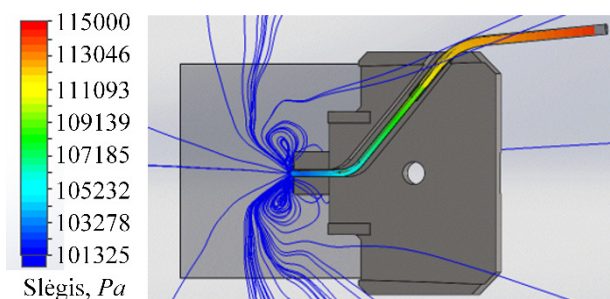
2.10 paveiksle pateiktame modelyje įvertinama ortakio geometrija. Pirmoji ortakio dalis yra žalvarinis vamzdelis, kurio vidinis skersmuo 0,4 mm, išorinis 0,6 mm, ilgis apie 15 mm. Antroji dalis – silikoninė žarnelė, kurios vidinis skersmuo 0,6 mm, ilgis apie 40 mm. Didžiausi aerodinaminiai nuostoliai tikėtini ties skirtingo skersmens ortakių sujungimu bei ploniausiame ortakyje. Modelyje taip pat įvertinama bandinio paviršiaus forma. Modeliuojamas bandinys, kurio plotas $100 \times 100 \mu\text{m}$, jis yra periodinės struktūros, nelygumų aukštis $0,1 \mu\text{m}$, nelygumų pasikartojimo periodas $2 \mu\text{m}$. Analogiškas bandinys bus naudojamas atliekant modifikuoto AFM jutiklio dinaminių charakteristikų tyrimus. Skirtingai nuo prieš tai naudoto modelio, patikslintame modelyje įvertinami ir specialiai suprojektuoto svirtelės laikiklio geometriniai parametrai, kurie apriboja pradinio atstumo diapazoną nuo ortakio galo iki svirtelės viršutinio paviršiaus. Šiame modelyje jis buvo

keičiamas nuo 0,407 mm iki 0,607 mm kas 0,025 mm. Minėtame diapazone užtikrinamas geriausias slėgio pasiskirstymas išilginiame svirtelės pjūvyje, kaip pa-vaizduota 2.11 paveiksle, todėl darome prielaidą, jog naudojant skirtingų ilgių ir pločių svirtes, jos vis tiek bus efektyviai veikiamos aerodinaminės jėgos.



2.11 pav. Slėgio pasiskirstymas išilginiame svirtelės pjūvyje (žalia ir geltona spalvomis pažymėtos padidinto slėgio sritys)

Fig. 2.11. Distribution of pressure in the longitudinal section of the cantilever (green and yellow are marked areas with higher pressure)



2.12 pav. Slėgio pasiskirstymas ortakyje (raudona, geltona ir žalia spalvomis pažymėtos padidinto slėgio sritys)

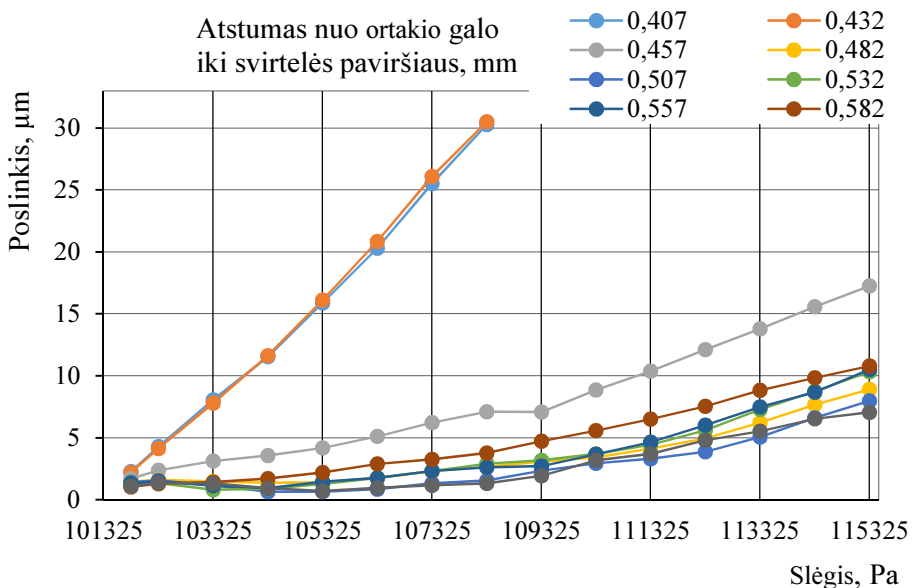
Fig. 2.12. Distribution of pressure in the air duct (red yellow and green are marked areas with higher pressure)

Atliekant tyrimus su patikslintu modeliu naudojama šiek tiek papildyta anksčiau aprašyta metodika. Nuo prieš tai buvusios ji skiriasi tuo, kad atstumas nuo ortakio galo iki svirtelės paviršiaus L (2.6 a pav.) keičiamas siauresnėse ribose mažesniu žingsniu bei tuo, kad dar papildomai yra keičiamas ir suspausto oro slėgis nuo 101825 Pa iki 115325 Pa žingsniu 500 Pa. Šiuo atveju smarkiai didesnės slėgio vertės parenkamos dėl naudojamo didesnio skersmens ortakio bei dėl to, jog patikslintame modelyje įvertinama dalis aerodinaminių nuostolių. Viršutinė

slėgio riba parenkama remiantis eksperimentiniais tyrimais, kurie rodo, jog tolesnis slėgio didinimas nėra efektyvus (2.2 poskyris). Slėgio pasiskirstymas ortakyje pavaizduotas 2.12 paveiksle.

Iš 2.12 paveikslo matome, jog ortakyje pastebimas žymus slėgio kritimas, kuris yra susijęs su dideliais aerodinaminiais nuostoliais ties ortakio skersmens sumažėjimo vieta bei lenkimo vietose.

Modeliavimo rezultatai, pateikiantys priklausomybes tarp pradinio įėjimo slėgio ir svirtelės poslinkio P (2.6 b pav.), esant skirtingoms atstumo L (2.6 a pav.) vertėms, yra pateikiami 2.13 paveiksle.



2.13 pav. Priklausomybės tarp suspausto oro slėgio ir svirtelės poslinkio, esant skirtingoms atstumo nuo ortakio galo iki svirtelės viršutinio paviršiaus vertėms

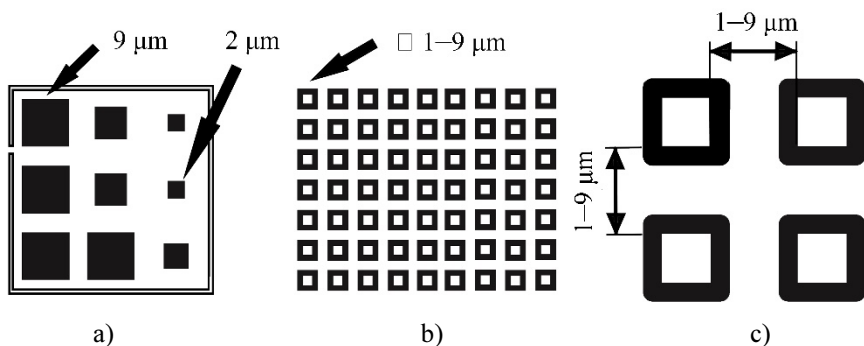
Fig. 2.13. Dependences between compressed air pressure and cantilever displacement at different distances from the end of the air duct to the upper surface of the cantilever

Modeliavimo rezultatai gali būti pateikiami analogiškoje formoje kaip ir 2.6 paveiksle, t. y. kaip priklausomybės tarp atstumo L (2.6 a pav.) ir svirtelės poslinkio, esant skirtingiems įėjimo slėgiams. Iš 2.13 paveikslo matyti, jog esant minimaliems atstumams L (0,407 ir 0,432), net ir sąlyginai nedidelis įėjimo slėgis sukelia žymų svirtelės poslinkį, kuris yra proporcingas slėgiui. Gauti simuliacijos rezultatai įrodo, jog keičiant įėjimo slėgį yra įmanoma valdyti aerodinaminės jė-

gos sukuriamą svirtelės poslinkį, kartu ir papildomą aerodinaminės jėgos sukuriamą standumą. Gautas priklausomybės aproksimavus trečios arba antros eilės polinomais galima jas panaudoti matematiniame modifikuoto AFM jutiklio modelyje, aprašant aerodinaminės jėgos sukuriamą poveikį.

2.2.3. Teoriniams atominių jėgų mikroskopo jutiklio tikslumo tyrimams naudojami bandiniai

Vokietijos Braunschveigo technikos universiteto mikrotechnologijų institute buvo pagaminti bandiniai, skirti teoriniams ir eksperimentiniams tyrimams. Siekiant patikrinti sukurto matematinio modelio adekvatumą bei siūlomo AFM greitaveikos didinimo metodo universalumą, buvo nuspręsta, jog tikslinga pasigaminti bandinius su periodiniais paviršiaus nelygumais. Bandinių paviršiaus forma bei paviršiaus nelygumų periodas pasirinkti remiantis praktiniais sumetimais, atsižvelgiant į dažniausiai naudojamų kalibravimo gardelių specifikacijas. Buvo pagaminti bandiniai su skirtingo dydžio simetriškai išdėstytais kvadrato formos iškilimais bei koncentriškai išdėstytais apskritimais. Bandinių struktūra pavaizduota 2.14 ir 2.15 paveiksluose.



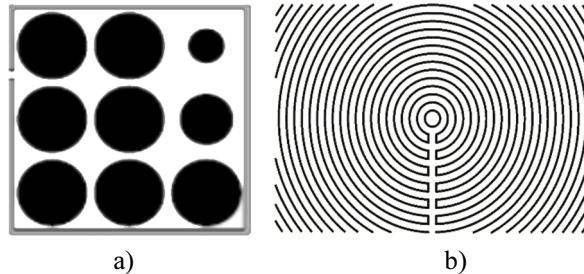
2.14 pav. Fotolitografijos kaukė: a) bendras vaizdas; b) padidintas ploto su vienodomis struktūromis vaizdas; c) padidinti keturi kvadratai

Fig. 2.14. Photolithography mask: a) common view; b) view of one square from a) part; c) zoomed view of four squares

Staciakampių struktūrų dydis ir periodas buvo skirtingas – nuo 1 μm iki 9 μm , o struktūros aukštis – 50 nm. Struktūrų su koncentriškais apskritimais aukštis taip pat – 50 nm, periodas – nuo 2 μm iki 9 μm , kaip parodyta 2.14 paveiksle.

Bandiniai buvo gaminami taikant fotolitografijos technologiją. Boro silikato (BSiO_4) stiklo ruošinys (700 μm storio) padengtas 50 nm storio chromo sluoksniu, kuris vėliau dengiamas fotorezistu naudojant 2.14 ir 2.15 paveiksluose pavaiz-

duotą kaukę. Chromo sluoksnis ėsdinamas 3 minutes, vėliau fotorezistas pašalinamas, gautos struktūros plaunamos ir džiovinamos. Pagaminti bandiniai pavaizduoti 2.16 paveiksle.

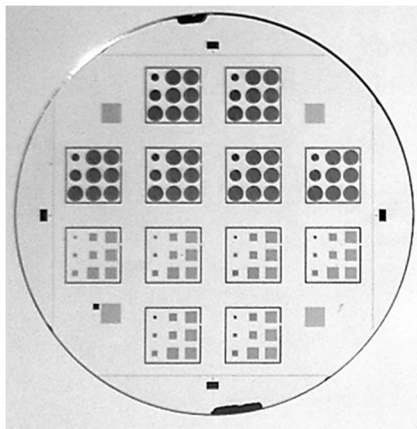


2.15 pav. Fotolitografijos kaukė struktūroms su koncentriškais apskritimais:

a) bendras vaizdas; b) padidintas vaizdas

Fig. 2.15. Photolithography mask for structure with concentric circles:

a) common view; b) zoomed view

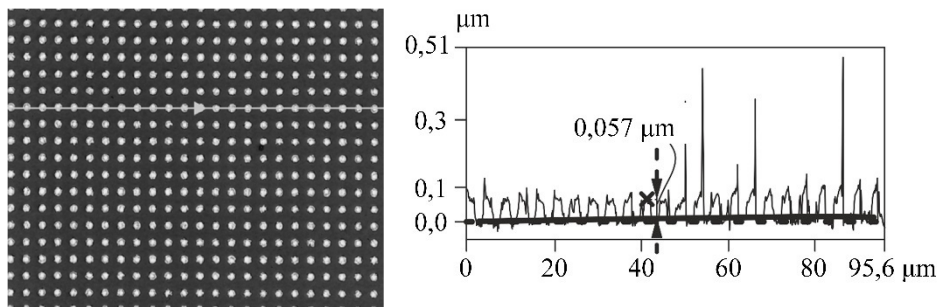


2.16 pav. Pagaminti bandiniai

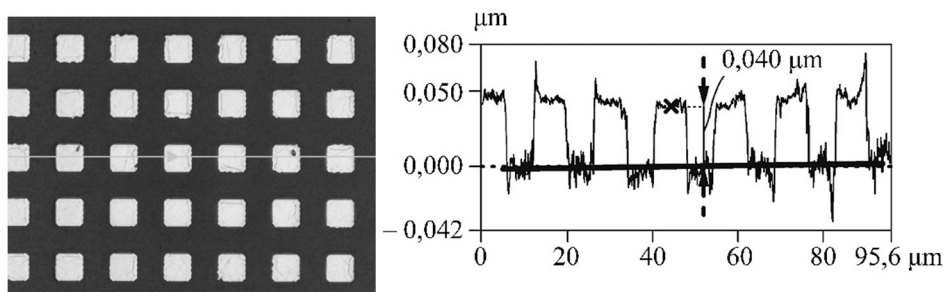
Fig. 2.16. Produced samples

Pagamintų bandinių kokybė buvo vertinama matuojant jų paviršiaus nelygumų aukštį keliose laisvai pasirinktose vietose, įvertinus prielaidą, jog litografijos metu visas ruošinys buvo padengtas vienodo storio chromo sluoksniu. Matavimai atlikti naudojant skenuojantį optinį mikroskopą VK-X260K (KEYENCE, Itasca, IL, USA), kurio vertikalios ašies skiriamoji geba yra 0,5 nm. Matavimo rezultatai, gauti išmatavus struktūras, kurių periodas 2 ir 9 μm , pateikiami 2.17 paveiksle.

Kaip matyti iš 2.17 pav., sukurti bandiniai turi nelygią paviršiaus struktūrą su staigiais aukščio pokyčiais. Lengviau suprantamas trimatis struktūrų vaizdas sukurta naudojant „Keyence“ firmos programinę įrangą pateiktas 2.18 paveiksle.



a)



b)

2.17 pav. Pagaminti bandiniai, išmatuoti skenuojančiu optiniu mikroskopu:

a) nuskenuotos struktūros iš 2.16 paveikslo. struktūrų periodas 2 μm ;

b) struktūrų periodas 9 μm

Fig. 2.17. Fabricated structures, measured by scanning optical microscope:

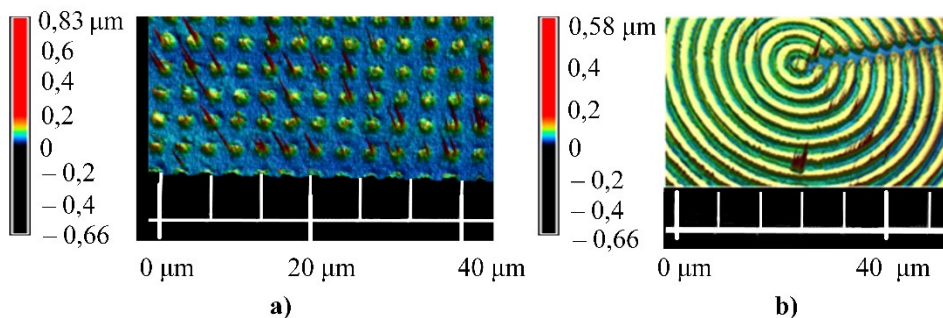
a) scanned structure from figure. 2.16 structure period 2 μm ;

b) structure period 9 μm

Kaip matyti iš 2.18 paveikslo sukurti bandiniai yra periodinės struktūros, bet nėra idealiai vienodi. Aukščiausi paveiksle matomi pikai yra interpretuojami kaip matavimo paklaidos, atsirandančios dėl šviesos atspindžio nuo chromo struktūros briaunų ir nėra vertinami.

Skenuoti 2.18 paveiksle pavaizduotas struktūras su AFM yra pakankamai sudėtinga ir tikėtina, jog esant tam tikriems greičiams svirtelės ir bandinio kontaktas

bus nestabilus, ir susidarys matavimo paklaidos. Be to, neidealaus bandinio paviršiaus forma buvo naudojama kaip modelio jėgimo signalas siekiant simuliuoti AFM veikimą realiomis sąlygomis.

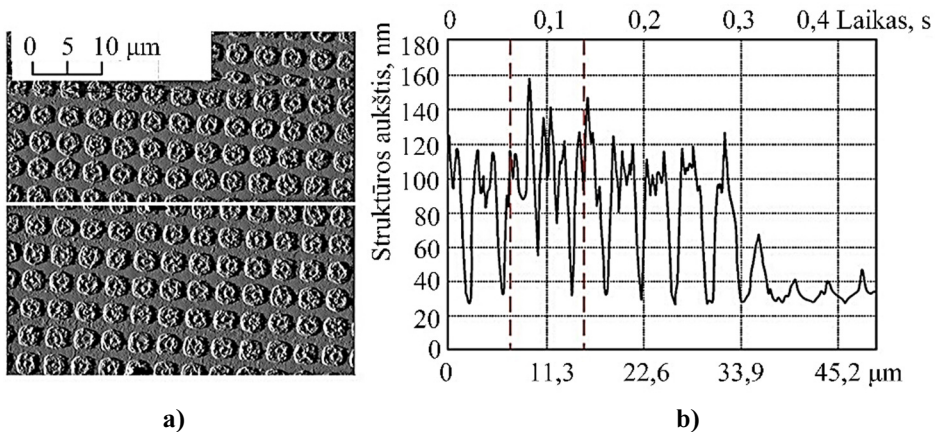


2.18 pav. Trimatis išmatuotų struktūrų vaizdas: a) nuskenuotos stačiakampės struktūros iš 2.14 pav. struktūrų periodas 2 μm; b) koncentriški apskritimai iš 2.15 pav. struktūrų periodas 2 μm

Fig. 2.18. Three-dimensional view of measured structures: a) scanned rectangular structures from Fig. 2.14 period 2 μm; b) scanned concentric structures from Fig. 2.15, period 2 μm

Skenuojančiu optiniu mikroskopu nuskenuoti rezultatai yra naudingi, nes žinant realią bandinių struktūrą tolimesni AFM eksperimentai taps aiškesni ir patikimesni. Šie matavimo duomenys naudojami kaip kontroliniai taškai tolimesniuose tyrimuose. Toliau šiame poskyryje pateikiama metodika kaip iš realaus bandinio skenavimo duomenų yra formuojamas matematinio modelio jėgimo signalas.

Siekiant suformuoti kuo realesnį modelio jėgimo signalą, 2.16 paveiksle pavaizduoti bandiniai buvo skenuojami periodinio kontakto režimu komerciniu AFM „NanoWizard III“ (JPK Instruments) zondų „Veeco NCHV“. Pagrindinės zondo charakteristikos pateikiamos 2.2 lentelėje. Bandiniai buvo skenuojami 112,5 μm/s (2 linijos per sekundę) greičiu. Skenavimo rezultatai pavaizduoti 2.19 a paveiksle. Iš nuskenuoto ploto viena linija pasirenkama kaip modelio jėgimo signalas (2.19 b pav.). T. y. iš skenavimo metu sukurtos struktūros atvaizdo (2.19 a pav.) nustatyta priklausomybė tarp bandinio koordinatės ir jo paviršiaus nelygumų aukščio (2.19 b pav. apatinė skalė). Norint šią paviršiaus charakteristiką panaudoti kaip jėgimo signalą modelyje, būtina, atsižvelgiant į skenavimo greitį, šią charakteristiką perskaiciuoti į paviršiaus nelygumų aukščio priklausomybę nuo laiko (2.19 b pav. viršutinė skalė).



2.19 pav. Nuskenuto paviršiaus vaizdas: a) nuskenutas plotas su pasirinkta linija;
b) vienos linijos paviršiaus profilis

Fig. 2.19. Image of scanned surface: a) scanned surface with the selected line;
b) profile of one scanned line

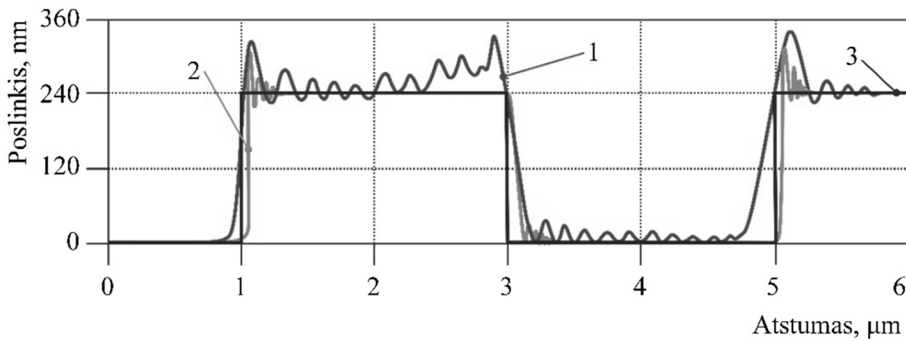
Aukščiau aprašytu būdu suformuotas modelio įėjimo signalas leidžia modeliuoti realios struktūros skenavimą skirtingais greičiais.

2.3. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio mechaninės struktūros modeliavimo rezultatai

Siekiant verifikuoti sudaryto modelio adekvatumą, buvo simuliuojama situacija kai 112 $\mu\text{m/s}$ greičiu, naudojant kietą svirtelę (2.2 lentelė), skenuojama kalibravimo gardelė, kurios paviršiaus nelygumų aukštis 240 nm, žingsnis 2 μm (2.5 pav. įėjimo koordinatė δ). Gauti modeliavimo rezultatai (2.5 pav. išėjimo koordinatė η_2), apibūdinantys AFM jutiklio svirtelės poslinkio priklausomybę nuo laiko, atsižvelgiant į skenavimo greitį, buvo perskaičiuoti į svirtelės poslinkio priklausomybę nuo nuskenuto atstumo ir lyginami su eksperimentiniais duomenimis, gautais analogiškoms sąlygoms skenuojant kalibravimo gardelę. Kalibravimo gardelės teorinio profilio, modelio išėjimo (2.5 pav.) bei eksperimentiškai išmatuoto kalibravimo gardelės profilio palyginimo rezultatai pateikiami 2.20 paveiksle.

Iš 2.20 pav. matome, jog modeliavimo rezultatai gerai atitinka eksperimento rezultatus: skirtumas vertikalioje ašyje, kai svirtelė juda į viršų – 6,2 %, skirtumas horizontalioje ašyje – 5,8 %, svirtelėi judant žemyn, skirtumas vertikalioje ašyje yra 6,4 %, o horizontalioje yra 3,2 %. Nepaisant pakankamai gero kritinių kreivės

taškų sutapimo eksperimentiniu būdu gautoje kreivėje, matomi žemesnio dažnio svyravimai, kurie gali būti sukelti kalibravimo gardelės paviršiaus formos netikslumų arba kitų AFM komponentų, kurių įtaka modelyje nebuvo vertinama.



2.20 pav. Modeliavimo ir eksperimento rezultatų palyginimas, kai naudojama kieta svirtelė (2.2 lentelė) ir skenuojama $112 \mu\text{m/s}$ greičiu: 1 – eksperimentiškai nustatyta nemodifikuoto jutiklio charakteristika, 2 – sumodeliuota nemodifikuoto jutiklio charakteristika, 3 – teorinis kalibravimo gardelės profilis

Fig. 2.20. Comparison between modeled and measured cantilever's displacement, using stiff cantilever's (Table 2.2), and applying scanning speed $112 \mu\text{m/s}$:

1 – experiment with non-modified atomic force microscope sensor; 2 – response of non-modified atomic force microscope sensor from a model; 3 – theoretical profile of calibration grating

2.2 lentelė. Kietos svirtelės parametrai ir modeliavimo sąlygos

Table 2.2. Parameters of stiff cantilever and modeling conditions

Svirtelės parametrai			
Ilgis L , μm	117		
Masė m_I , kg	$7,96 \cdot 10^{-11}$		
Rezonansinis dažnis f , kHz	320		
Standumas k , N/m	40		
Storis t , μm	3,5		
Plotis w , μm	33		
Tamprumo modulis E , GPa	310		
Modeliavimo sąlygos			
Greitis	112 $\mu\text{m/s}$	11,2 mm/s	1,12 m/s
Slėgis, Pa	60		

Įvertinus modelio adekvatumą, tolimesni teoriniai tyrimai buvo atliekami naudojant 2.19 b paveiksle pateiktą charakteristiką kaip modelio jėgimo signalą. AFM jutiklio dinaminės charakteristikos vertinamos lygiagrečiai simuliuojant du atvejus: kai naudojamas nemodifikuotas AFM jutiklis ir kai naudojamas pagal pasiūlytą metodą patobulintas jutiklis. Buvo modeliuojamos skirtingo standumo ir dydžio svirtelės, skenuojama skirtingais greičiais naudojant skirtingus suspausto oro slėgius. Atsižvelgiant į pagrindinius modeliuojamų svirtelių parametrus, visus teoriškai tirtus atvejus galima suskirstyti į dvi grupes: kai naudojama kieta svirtelė (standumas 40 N/m); ir kai naudojama minkšta svirtelė (standumas 0,2 N/m). Pagrindinės modeliuojamų svirtelių charakteristikos bei modeliavimo sąlygos pateikiamos 2.2 ir 2.3 lentelėse.

2.3 lentelė. Minkštos svirtelės parametrai ir modeliavimo sąlygos

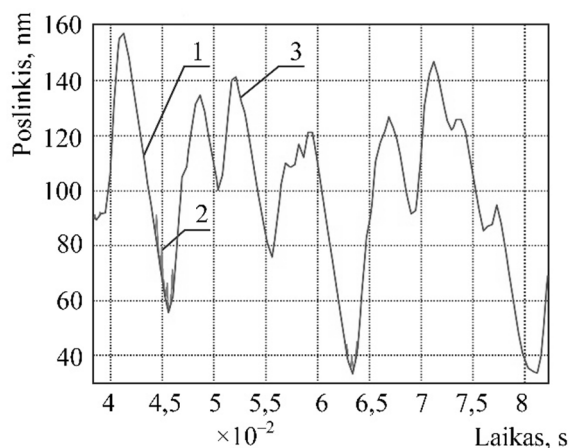
Table 2.3. Parameters of soft cantilever and modeling conditions

Svirtelės parametrai				
Ilgis L , μm	450			
Masė m_I , kg	$14,3 \cdot 10^{-11}$			
Rezonansinis dažnis f , kHz	13			
Standumas k , N/m	0,2			
Storis t , μm	2			
Plotis w , μm	50			
Tamprumo modulis E , GPa	310			
Modeliavimo sąlygos				
Greitis, $\mu\text{m/s}$	112	1120		
Slėgis, Pa	60	60	40	20

Kaip matome iš 2.2 lentelės, naudojant kietą svirtelę simuliuojami trys skirtingi skenavimo greičiai (112 $\mu\text{m/s}$, 11,2 mm/s, 1,12 m/s) esant vienodam suspausto oro slėgiui (60 Pa). Praktikoje minkštos svirtelės dažniausiai naudojamos skenuojant mažesniais greičiais, todėl naudojant minkštą svirtelę (2.3 lentelė) simuliuojami du skirtingi skenavimo greičiai (112 $\mu\text{m/s}$, 1120 $\mu\text{m/s}$) bei esant greičiui 1120 $\mu\text{m/s}$ įvertinamas aerodinaminės jėgos poveikis, kai suspausto oro slėgis yra 60 Pa, 40 Pa, 20 Pa. Gauti modeliavimo rezultatai pateikiami tolimesniuose poskyriuose.

2.3.1. Atominių jėgų mikroskopo standžiojo jutiklio modeliavimo rezultatai

Pirmiausia modeliavimas buvo atliekamas naudojant kietą svirtelę, simuliuojant skenavimo greitį $112 \mu\text{m/s}$ (tai greitis, kuriuo buvo nuskenotas bandinys (2.19 pav.)). 2.21 paveiksle pateikti modeliavimo rezultatai, kaip ir buvo tikimasi, rodo, jog esant sąlyginai mažam skenavimo greičiui suspausto oro srauto sukuriama dinaminė jėga neturi labai žymaus poveikio skenavimo kokybei.



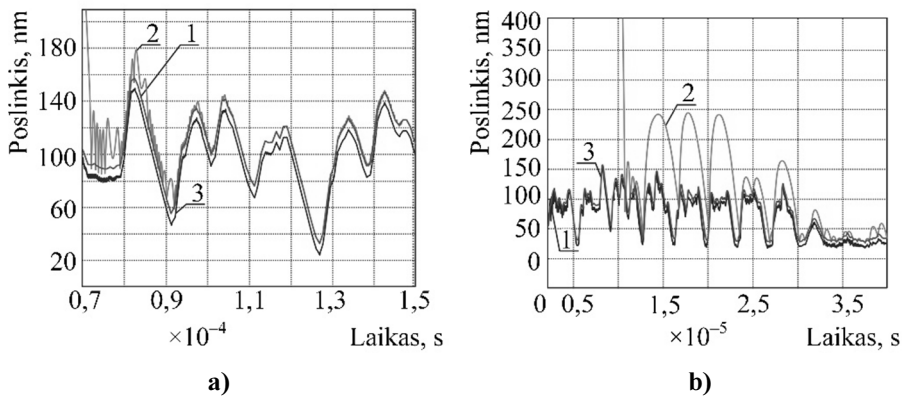
2.21 pav. Kietos svirtelės (2.2 lentelė) poslinkis, kai naudojamas 2.19 b paveiksle pavaizduotas žadinimo signalas. Skenavimo greitis $112 \mu\text{m/s}$; suspausto oro slėgis 60 Pa; 1 – žadinimo signalas; 2 – originalaus atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas; 3 – modifikuoto atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas

Fig. 2.21. The displacement of stiff cantilever (Table 2.2) response to excitation, obtained using experimental data from figure 2.19 b as an input signal. Scanning speed $112 \mu\text{m/s}$; applied pressure 60 Pa; 1 – excitation signal; 2 – response of non-modified atomic force microscope sensor; 3 – response of the modified sensor

Iš 2.21 paveikslo matome, jog svirtelės poslinkio kreivės beveik visiškai atitinka žadinimo signalą, išskyrus kelis originalaus AFM zondo nuokrypius giliose „duobutėse“. Tai reiškia, jog kontaktas tarp zondo ir bandinio paviršiaus visą laiką yra pastovus, išskyrus anksčiau paminėtus nuokrypius. Modifikuoto AFM jutiklio poslinkio kreivė visiškai atitinka žadinimo signalą – tai reiškia, jog net esant mažam skenavimo greičiui pastebimas teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis vietoje, kur staigiai keičiasi bandinio paviršiaus geometrija. Kadangi nėra vertikalios persislinkimo tarp originalaus ir modifikuoto jutiklio poslinkio kreivių, galima daryti išvadą, jog 60 Pa slėgis ortakio išėjime nesukelia žymaus prispaudymo jėgos

tarp zondo ir bandinio paviršiaus padidėjimo, kai naudojama svirtelė, kurios standumas 40 N/m.

Kadangi esant 112 $\mu\text{m/s}$ skenavimo greičiui, kontaktas tarp zondo ir bandinio paviršiaus yra pakankamai stabilus net ir naudojant originalų AFM jutiklį, tolimesniuose skaičiavimuose siekiant įvertinti AFM greitaveikos didinimo galimybes skenavimo greitis buvo padidintas iki 11,2 mm/s ir 1,12 m/s. Simuliacijos rezultatai gauti esant gerokai didesniai skenavimo greičiui pateikiami 2.22 paveiksle.



2.22 pav. Kietos svirtelės (2.2 lentelė) poslinkis, kai naudojamas 2.19 b paveiksle pavaizduotas žadinimo signalas: a) skenavimo greitis 11.2 mm/s; b) skenavimo greitis 11.2 m/s, suspausto oro slėgis 60 Pa; 1 – žadinimo signalas; 2 – originalaus atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas; 3 – modifikuoto atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas

Fig. 2.22. The displacement of stiff cantilever (Table 2.2) response to excitation, obtained using experimental data from figure 2.19 b as an input signal: a) scanning speed 11.2 mm/s; b) scanning speed 11.2 m/s, applied pressure 60 Pa; 1 – excitation signal; 2 – response of non-modified atomic force microscope sensor; 3 – response of the modified sensor

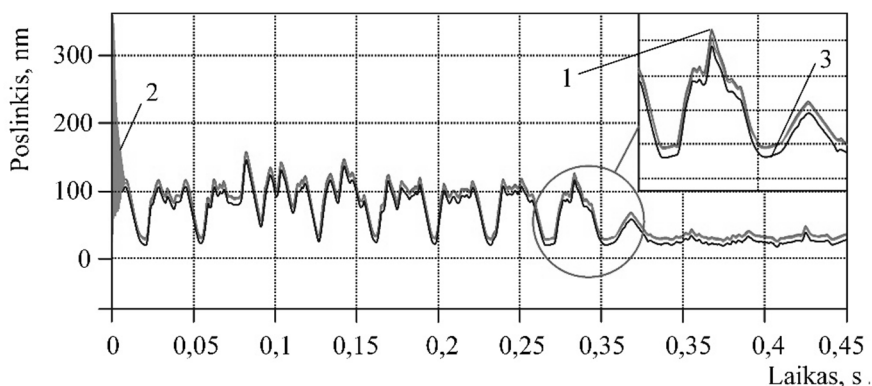
Smarkiai padidinus skenavimo greitį, pastebimi žymūs skirtumai tarp žadinimo ir originalaus AFM jutiklio atsako kreivių (2.22 pav.). Tai rodo, jog esant tokioms skenavimo sąlygoms yra prarandamas pastovus kontaktas tarp zondo ir bandinio paviršiaus. Modifikuoto AFM jutiklio atsako kreivė su minimaliais nuokrypiais atkartoja žadinimo signalo formą, kai skenavimo greitis 11,2 mm/s. Kai skenavimo greitis siekia 1,12 m/s, žadinimo signalo forma vis dar yra atkantojama, bet jau pastebimi svirtelės aukšto dažnio virpesiai, kurie pablogina naudingo signalo ir triukšmo santykį. Esant 1,12 m/s skenavimo greičiui nežymus vertikalus persislinkimas tarp žadinimo ir modifikuoto jutiklio atsako kreivių rodo, jog esant

tokioms skenavimo sąlygoms, naudojant 60 Pa slėgio sukuriamą aerodinaminę jėgą, minimaliai padidėja sąveikos jėga tarp zondo ir bandinio paviršiaus. Įvertinus 2.21 ir 2.22 paveiksluose pateiktus rezultatus galima teigti, jog modeliuojamu atveju, kai naudojamas modifikuotas AFM jutiklis (svirtelės standumas 40 N/m, suspausto oro slėgis 60 Pa), skenavimo greitį galima padidinti iki 1,12 m/s, tuo tarpu tokiu pat greičiu originaliu AFM jutikliu skenuojant analogišką struktūrą nebeužtikrinama tinkama matavimo kokybė.

Siekiant patikrinti siūlomo metodo universalumą, modeliuojamas metodo taikymas, kai naudojamos minkštos ir kietos svirtelės. Rezultatai gauti naudojant minkštą svirtelę pateikiami tolimesniame poskyryje.

2.3.2. Atominių jėgų mikroskopo slankiojo jutiklio modeliavimo rezultatai

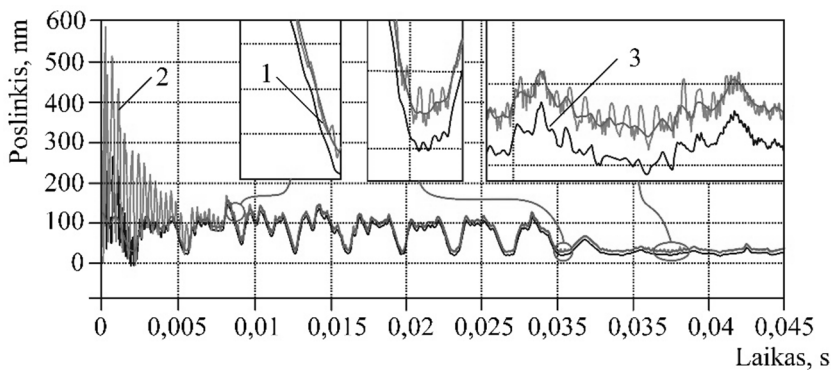
Skenavimas naudojant minkštą svirtelę modeliuojamas taikant analogišką metodiką, kaip ir anksčiau aprašytu atveju. Pirmiausiai simuliuojama situacija, kai 112 $\mu\text{m/s}$ greičiu skenuojama ta pati struktūra (2.19 b pav.). Gauti rezultatai pateikiami 2.23 paveiksle.



2.23 pav. Minkštos svirtelės (2.3 lentelė) poslinkis, kai naudojamas 2.19 b paveiksle pavaizduotas žadinimo signalas; skenavimo greitis 112 $\mu\text{m/s}$; suspausto oro slėgis 60 Pa. 1 – žadinimo signalas, 2 – originalaus atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas, 3 – modifikuoto atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas

Fig. 2.23. The displacement of soft cantilever (Table 2.3) response to excitation, obtained using experimental data from figure 2.19 b as an input signal; scanning speed 112 $\mu\text{m/s}$; applied pressure 60 Pa; 1 – excitation signal; 2 – response of non-modified atomic force microscope sensor; 3 – response of the modified sensor

Kaip matome iš 2.23 paveikslo, originalaus AFM jutiklio atsako signalas sutampa su žadinimo signalu, tai reiškia, jog yra užtikrinamas stabilus kontaktas tarp zondo ir bandinio paviršiaus. Lyginant originalaus ir modifikuoto jutiklio atsakus pastebimas nežymus persislinkimas vertikalia kryptimi. Tai rodo, kad dėl panaudojamo aerodinaminės jėgos efekto šiek tiek padidėja sąveikos jėga tarp zondo ir bandinio paviršiaus, skenuojant sąlyginai minkštas medžiagas sąveikos jėgos padidėjimas gali padidinti matavimo paklaidas tose vietose, kur staigiai keičiasi paviršiaus nelygumų pobūdis. Analogiškai kaip ir kietos svirtelės atveju, skenuojant pakankamai mažais greičiais teigiamas patobulinimo efektas nėra žymus, nes kontakto praradimo tarp zondo ir paviršiaus tikimybė yra labai maža. Todėl toliau skaičiavimuose skenavimo greitis didinamas 10 kartų iki $1120 \mu\text{m/s}$, gauti simuliacijos rezultatai pateikiami 2.24 paveiksle.

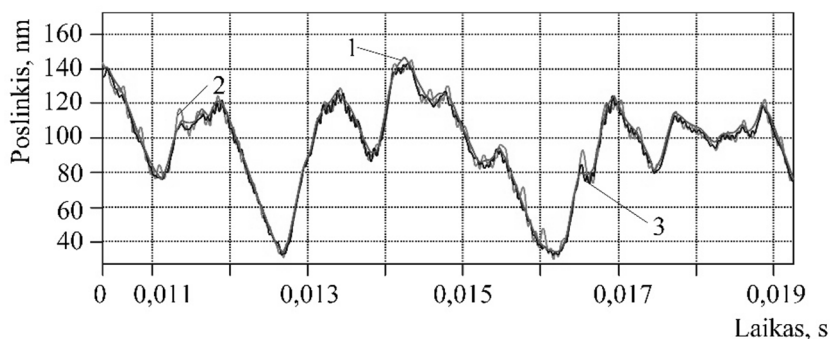


2.24 pav. Minkštos svirtelės (2.3 lentelė) poslinkis, kai naudojamas 2.19 b paveiksle pavaizduotas žadinimo signalas, skenavimo greitis $1120 \mu\text{m/s}$, suspausto oro slėgis 60 Pa. 1 – žadinimo signalas, 2 – originalaus atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas, 3 – modifikuoto atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas

Fig. 2.24. The displacement of soft cantilever (Table 2.3) response to excitation, obtained using experimental data from figure 2.19 b as an input signal; scanning speed $1120 \mu\text{m/s}$; applied pressure 60 Pa; 1 – excitation signal; 2 – response of non-modified atomic force microscope sensor; 3 – response of the modified sensor.

Naudojant minkštą svirtelę, padidinus skenavimo greitį iki $1120 \mu\text{m/s}$ (2.24 pav.) matome, jog originalaus AFM jutiklio atsakas skiriasi nuo žadinimo signalo, pastebimi svyravimai, ypač tose vietose, kur staigiai keičiasi paviršiaus forma arba paviršiaus nelygumai kartojasi dideliu dažniu, bet yra nedidelės amplitudės. Modifikuoto jutiklio atsako signalas daug panašesnis į žadinimo signalą – tai rodo teigiamą aerodinaminės jėgos poveikį AFM jutiklio dinaminėms savybėms. Vertikalus persislinkimas žadinimo signalo atžvilgiu rodo padidėjusią svir-

telės prispaudimo jėgą, todėl galima teigti, jog skenuojant minkšta svirtelę suspausto oro slėgis 60 Pa yra per didelis. Toliau pateikiami rezultatai gauti simuliuojant atvejus, kai esant tam pačiam skenavimo greičiui naudojamas mažesnis suspausto oro slėgis. Modeliavimo rezultatai, kai skenuojama minkšta svirtelė 1120 $\mu\text{m/s}$ greičiu, esant 40 Pa suspausto oro slėgiui, pateikiami 2.25 paveiksle.

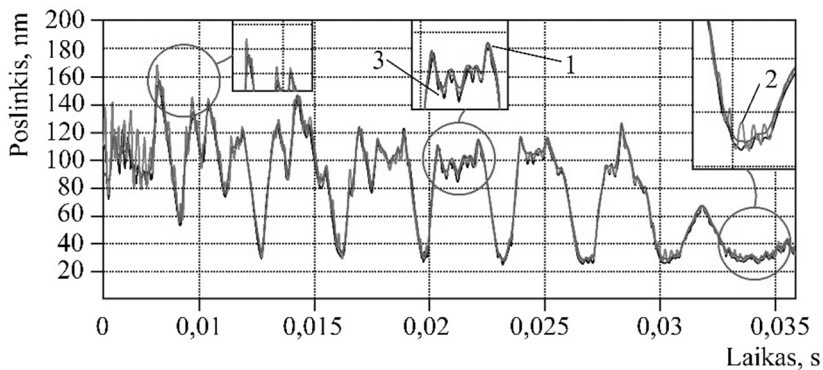


2.25 pav. Minkštos svirtelės (2.3 lentelė) poslinkis, kai naudojamas 2.19 b paveiksle pavaizduotas žadinimo signalas; skenavimo greitis 1120 $\mu\text{m/s}$, suspausto oro slėgis 40 Pa. 1 – žadinimo signalas; 2 – originalaus atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas; 3 – modifikuoto atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas.

Fig. 2.25. The displacement of soft cantilever (Table 2.3) response to excitation, obtained using experimental data from figure 2.19 b as an input signal; scanning speed 1120 $\mu\text{m/s}$; applied pressure 40 Pa; 1 – excitation signal; 2 – response of non-modified atomic force microscope sensor; 3 – response of the modified sensor.

Iš 2.25 paveikslo matome, jog sumažinus oro slėgį sumažėja ir vertikalus persislinkimas tarp modifikuoto ir originalaus AFM jutiklio atsako kreivių. Teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis išlieka pakankamai žymus, modifikuoto jutiklio atsakas geriau atitinka žadinimo signalo formą. Zondo atšokimo nuo paviršiaus amplitudės yra mažesnės ir laikotarpiai, kai zondas praranda kontaktą su bandinio paviršiumi, yra gerokai trumpesni lyginant su originalaus jutiklio atsaku.

Iš 2.26 paveikslo matome, jog 20 Pa suspausto oro srauto sukurtos aerodinaminės jėgos poveikio jau nepakanka, kad kontaktas tarp zondo ir bandinio būtų užtikrinamas visą laiką.



2.26 pav. Minkštos svirtelės (2.3 lentelė) poslinkis kai naudojamas 2.19 b paveiksle pavaizduotas žadinimo signalas; skenavimo greitis 1120 $\mu\text{m/s}$, suspausto oro slėgis 20 Pa. 1 – žadinimo signalas; 2 – originalaus atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas; 3 – modifikuoto atominių jėgų mikroskopo jutiklio atsakas

Fig. 2.26. The displacement of soft cantilever (Table 2.3) response to excitation, obtained using experimental data from figure 2.19 b as an input signal; scanning speed 1120 $\mu\text{m/s}$; applied pressure 20 Pa; 1 – excitation signal; 2 – response of non-modified atomic force microscope sensor; 3 – response of the modified sensor

Naudojant iki 20 Pa slėgio suspausto oro srautą modifikuoto ir originalaus jutiklio atsako kreivės labai supanašėja, nors, lyginant atsako kreives vietose kur staigiai keičiasi paviršiaus topografija, vis dar pastebimas teigiamas pridėtos aerodinaminės jėgos poveikis.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Remiantis V. K. Augustaičio siūloma dinaminio modelio sudarymo metodu bei literatūroje pateikiamais modeliais (Song, Bhushan 2008, Chang *et al.* 2005, Caruntu 2009, Kim *et al.* 2012), sudarytas matematinis AFM jutiklio modelis, leidžiantis įvertinti originalaus ir patobulinto AFM jutiklio charakteristikas bei nustatyti atvejus, kai yra prarandamas stabilus kontaktas tarp zondo ir bandinio paviršiaus.

2. Baigtinių elementų metodu sumodeliuotas aerodinaminės jėgos poveikis AFM svirtelei, nustatyti geometriniai modifikuoto AFM jutiklio svirtelės parametrai, sumodeliuotas jo trimatis poveikis, nustatyta aerodinaminės jėgos priklausomybė nuo paduodamo suspausto oro slėgio ir nuo atstumo tarp ortakio galo ir bandinio paviršiaus. Nustatyta, kad praktiniam taikymui geriausiai tinkamas atvejis, kai atstumas tarp ortakio galo ir svirtelės viršutinio paviršiaus yra 0,457 mm.

3. Taikant fotolitografijos metodą, pagaminti tolimesniems tyrimams tinkami bandiniai, įvertinta jų paviršiaus topografija ir suformuotas žadinimo signalas matematiniam modeliui, leidžiantis imituoti vienos linijos skenavimą skirtingais greičiais. Modelis tinkamas simuliuoti bet kokios pageidaujamos struktūros skenavimą skirtingais greičiais bei taikant skirtingą aerodinaminę jėgą, todėl leidžia nustatyti tinkamus parametrus realiems eksperimentams.

4. Nustatyta, jog naudojant siūlomą AFM greitaveikos didinimo metodą galima iki 10 kartų padidinti skenavimo greitį, kuris priklauso nuo bandinio paviršiaus topografijos ypatybių, naudojamo AFM aparatūrinės įrangos charakteristikų bei naudojamos svirtelės parametrų. Teigiamas aerodinaminės jėgos sukuriamas efektas pastebimas naudojant tiek kietą, tiek minkštą svirtelę. Tinkamiausias suspausto oro slėgis kietai svirtelei yra 60 Pa; minkštai svirtelei yra 40 Pa.

Eksperimentiniai atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio tyrimai

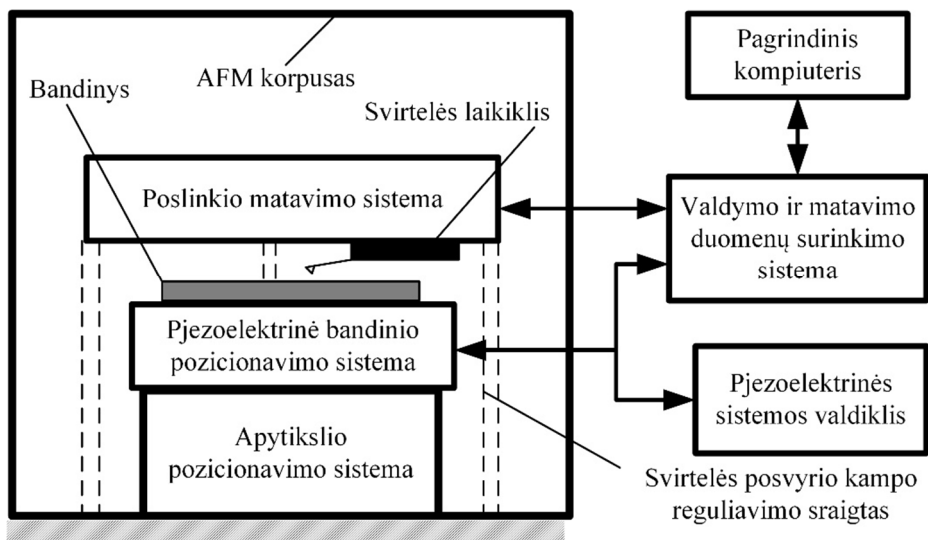
Šiame skyriuje aprašytas eksperimentinio tyrimo stendas ir eksperimentinių tyrimų metodika. Grafinėje formoje pateikti grafikai, iliustruojantys AFM greita-veikos problemą. Pateikti modifikuoto AFM jutiklio tyrimų rezultatai. Eksperi-mentiškai patikrinta, jog AFM svirtelės charakteristikos gali būti valdomos naudojant suspausto oro srauto sukuriamą aerodinaminę jėgą. Nustatyta skena-vimo paklaidų priklausomybė nuo skenavimo greičio, kai naudojamas originalus ir modifikuotas AFM jutiklis.

Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus straipsniai (Dzedzickis *et al.* 2018, Pelenis *et al.* 2018, Bučinskas *et al.* 2015.).

3.1. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio eksperimentinių bandymų stendas ir įranga

Šiame poskyryje aprašytas tyrimuose naudojamas AFM prototipas, mechatroninė suspausto oro tiekimo sistema bei papildoma įranga. Didžioji dalis eksperimenti-nių tyrimų buvo atliekama naudojant VMTI FTMC sukurtą AFM prototipą.

VMTI FTMC turimas AFM prototipas, lyginant su komerciniais pavyzdžiais, suteikia galimybes lengviau atlikti eksperimentus, reikalaujančius papildomų komponentų prijungimo bei prieigos prie AFM valdymo algoritmų. Prototipą sudaro: korpusas, pagamintas naudojant 3D spausdinimo technologiją; lazerinė DVD tipo svirtelės poslinkio nuskaitymo galvutė (URS143); pjezoelektrinė bandinio pozicionavimo sistema Nano-M350; AFM valdymo bei duomenų surinkimo sistema (NI USB 6361). Įrenginyje naudojama pjezoelektrinė pozicionavimo sistema Nano-M350 pozicionavimo tikslumui pasiekti naudoja pjezopavarose sumontuotus talpinius jutiklius bei uždaro ciklo pavarų valdymo algoritmus ir užtikrina 0,4 nm skiriamąją gebą ir 50 μm eigą x , y ašyse bei 0,1 nm skiriamąją gebą ir 20 μm eigą z ašyje. Valdymo ir duomenų nuskaitymo sistema NI USB 6361 leidžia matuoti svirtelės poslinkį bei pjezopavarų padėtį 200 kHz dažniu, išlaikant daugiau negu 1 nm matavimo tikslumą. Įrenginys valdomas naudojant originalią programinę įrangą, sukurtą programinio paketo „Labview2008“ bazėje. AFM prototipo konstrukcija plačiau aprašyta (Ulčinas, Vaitekonis 2017), struktūrinė AFM prototipo schema pavaizduota 3.1 paveiksle.

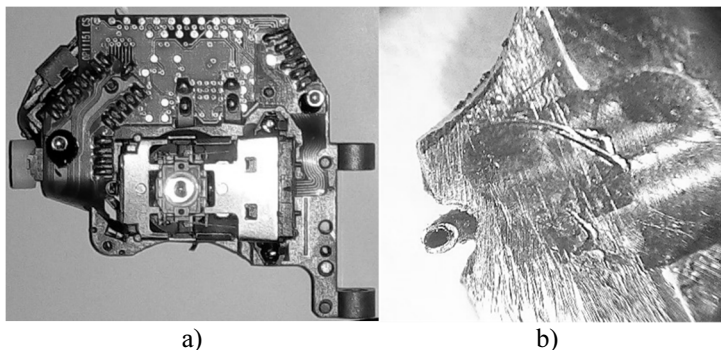


3.1 pav. Struktūrinė atominių jėgų mikroskopo prototipo schema

Fig. 3.1. Structural scheme of atomic force microscope prototype

Siekiant pritaikyti VMTI FTMC turimą AFM prototipą modifikuoto AFM jutiklio tyrimams buvo suprojektuotas ir pagamintas specialus svirtelės laikiklis su įmontuotu 0,4 mm skersmens ortakiu, kuris tvirtinamas prie svirtelės poslinkių matavimo sistemos. Suspaustas oras į laikiklį tiekiamas naudojant lanksčią silikoningą žarnelę, kurios vidinis skersmuo prie laikiklio yra 1 mm, o toliau padidėja iki

4 mm. Toks sprendimas leidžia maksimaliai sumažinti aplinkos veiksnių įtaką (ypač mechaninių virpesių) jautrios matavimo sistemos charakteristikoms. Laikiklio trimatis modelis bei atliktos aerodinaminės jėgos simuliacijos pateiktos 2.2 poskyryje. Lazerinė poslinkių matavimo sistema bei ant jos montuojamo svirtelės laikiklio su įdiegtu ortakiu fragmentas pavaizduoti 3.2 paveiksle



3.2 pav. Lazerinė svirtelės poslinkių nuskaitymo sistema: a) bendras vaizdas; b) padidintas vaizdas, laikiklis su įmontuotu ortakiu

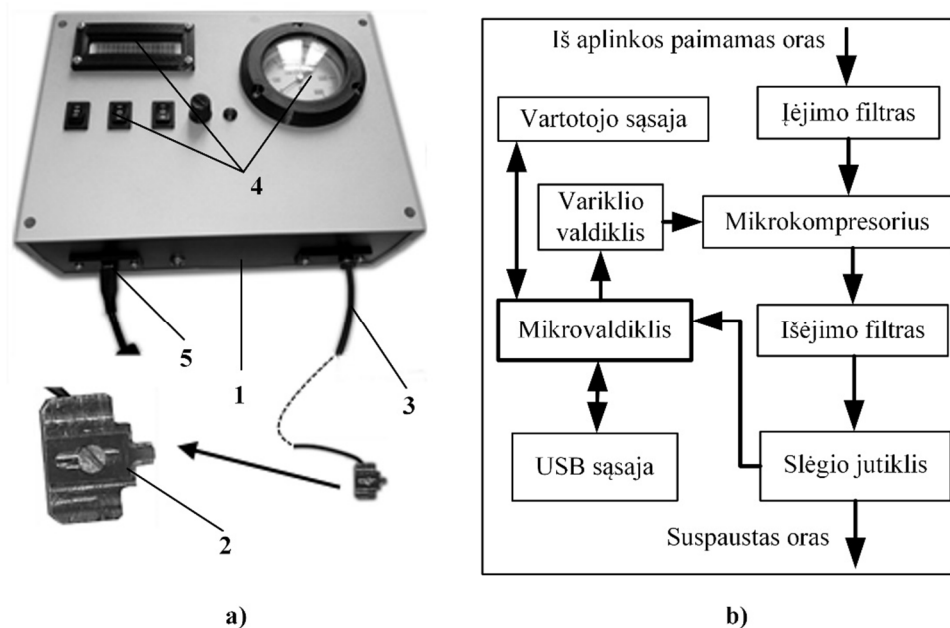
Fig. 3.2. The laser measurement system of cantilever displacement: a) general view; b) an enlarged view, holder with installed air duct

Atliekant modifikuoto AFM jutiklio eksperimentinius tyrimus, suspausto oro slėgis buvo valdomas naudojant specialiai šiam tikslui sukurtą mechatroninę sistemą, kuri pavaizduota 3.3 a paveiksle. Sukurtos sistemos struktūrinė schema pateikiama 3.3 b paveiksle.

Kaip matome iš 3.3 b paveikslo sistemoje naudojamas aplinkos oras, kurį mikrokompresorius įsiurbia per valymo filtrą. Reikiamas oro slėgis užtikrinamas naudojant uždaro tipo valdymo sistemą su grįžtamuju ryšiu. Suspausto oro slėgis matuojamas sistemos išėjime, naudojant slėgio jutiklį MPXV5050GP (Freescale Semiconductor, Austin, TX, USA), kurio matavimo ribos – nuo 0 iki 50 kPa, tikslumas $\pm 0,7$ kPa. 3.3 a paveiksle matomas manometras naudojamas kaip papildoma sistemos kalibravimo ir indikacijos priemonė, leidžianti padidinti matavimo tikslumą iki $\pm 0,1$ kPa. Oro slėgis reguliuojamas mikrovaldikliu STM32F103, keičiant mikrokompresoriaus efektyvumą pagal PID reguliatoriaus nurodymus. Mikrokompresoriaus sukuriama aukšto dažnio slėgio svyravimai išlyginami išėjimo filtre dar jiems nepasiekus slėgio jutiklio. Sukurta sistema turi du valdymo režimus: slėgis gali būti reguliuojamas naudojant vartotojo sąsajos priemones arba naudojant programinį valdymą.

Sukurta sistema su pagrindiniu AFM valdymo kompiuteriu bendrauja per USB sąsają. Jos programinė įranga yra visapusiškai suderinama su AFM prototipo

programine įranga ir leidžia užtikrinti suspausto oro tiekimą nuo 0,5 kPa iki 50 kPa (0,1 kPa tikslumu) bei išsaugoti slėgio reikšmes kartu su pjezopavarų padėties duomenimis.



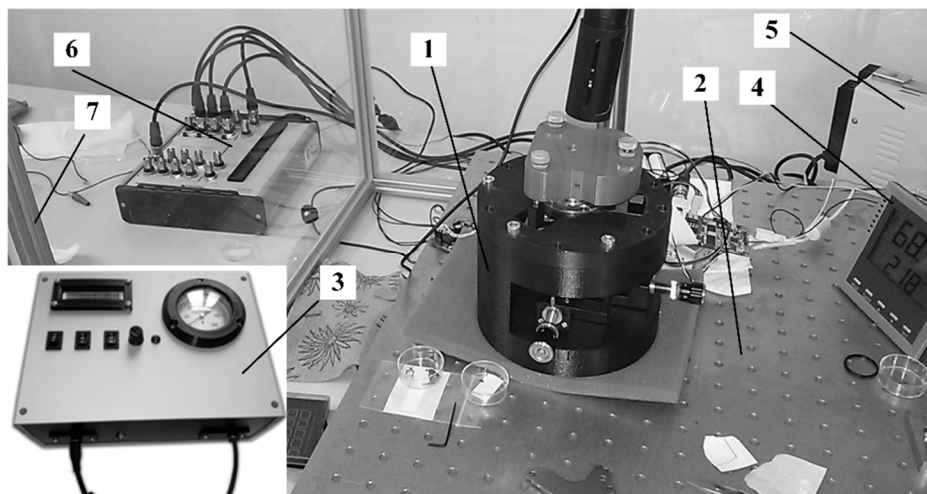
3.3 pav. Mechatroninė suspausto oro tiekimo sistema: a) sistemos bendras vaizdas:

1 – sistemos korpusas; 2 – svirtelės laikiklis; 3 – silikoninė žarnelė; 4 – vartotojo sąsaja; 5 – USB sąsaja; b) sistemos struktūrinė schema

Fig. 3.3. Mechatronic compressed air supply system: a) general view: 1 – housing of the system; 2 – cantilever holder; 3 – silicone hose; 4 – user interface; 5 – USB interface; b) structural scheme of the system

Surinktas ir eksperimentams paruoštas bandymų stendas pavaizduotas 3.4 paveiksle. AFM prototipas, kurio struktūrinė schema pateikta 3.1 paveiksle, yra sumontuotas ant antivibracinio staliuko, esančio po apsauginiu gaubtu, apsaugančiu AFM sistemą nuo dulkių, skersvėjo ir kitų aplinkos veiksnių. Potencialūs šilumos šaltiniai – maitinimo šaltinis bei valdymo ir matavimo duomenų surinkimo sistema laikomi apsauginio gaubto išorėje. Papildomai dar yra stebima oro temperatūra bei santykinės oro drėgmės lygis AFM aplinkoje. Šie duomenys naudojami pradiniam AFM derinimo etape bei gali būti panaudoti eliminuojant matavimo paklaidas, atsiradusias dėl šių parametrų pasikeitimo. Suspausto oro tiekimo sistema bei pagrindinis AFM valdymo kompiuteris, kurie dėl viduje esančių judančių detalių gali būti laikomi potencialiais mechaninių svyravimų šaltiniais ir turėti

įtakos matavimo rezultatų kokybei, buvo padėti ant atskiro stalo, kiek įmanoma toliau nuo AFM mechaninės sistemos.



3.4 pav. Atominių jėgų mikroskopo tikslumo tyrimų stendas: 1 – mechaninė atominių jėgų mikroskopo sistema; 2 – antivibracinis staliukas; 3 – suspausto oro tiekimo sistema; 4 – aplinkos parametrų matavimo įrenginys; 5 – atominių jėgų mikroskopo maitinimo šaltinis; 6 – atominių jėgų mikroskopo valdymo ir matavimo duomenų surinkimo sistema; 7 – apsauginis gaubtas

Fig. 3.4. Test rig of atomic force microscope accuracy: 1 – mechanical atomic force microscope system; 2 – anti-vibration table; 3 – compressed air supply system; 4 – device for measurement of environmental parameters; 5 – atomic force microscope power supply unit; 6 – atomic force microscope control and measurement data acquisition system; 7 – protective shield

Atliekant eksperimentinius tyrimus papildomai dar buvo panaudotas BioScope II (Veeco Instruments Ltd, Santa Barbara, USA) AFM, sujungtas su optiniu mikroskopu. Šis mikroskopas buvo naudojamas siekiant vizualizuoti AFM greitaveikos problemą ir skenuojant 2.2 poskyryje aprašytus bandinius.

3.2. Modifikuoto atominių jėgų mikroskopo eksperimentinių tyrimų metodika

Atliktus eksperimentinius tyrimus pagal jų pobūdį galima suskirstyti į dvi grupes: svirtelės poslinkių tyrimai (skenavimas nevykdomas, matuojami svirtelės poslinkiai įvairiomis sąlygomis); dinaminiai sistemos tyrimai (vyksta bandinio paviršiaus skenavimas įvairiomis sąlygomis). Toliau pateikiamos šių tyrimų atlikimo metodikos.

3.2.1. Svirtelę veikiančios aerodinaminės jėgos tyrimų metodika

Svirtelės poslinkių tyrimų tikslas – nustatyti aerodinaminės jėgos sukeltą poveikį AFM svirtelės charakteristikoms. Šių tyrimų atlikimo tvarka: pirmiausia svirtelė sumontuojama specialiaje laikiklyje ir pritvirtinama prie matavimo galvutės. Matavimo sistema suderinama analogiškai kaip ir komerciniuose AFM, t. y. lazerio spindulys nutaikomas į svirtelės galą. Nuskaitymo galvutė kartu su svirtele sumontuojama AFM korpuse ir prijungiama prie mechatroninės suspausto oro tiekimo sistemos. Galutinai suderinus matavimo sistemą ir įjungus suspausto oro tiekimo sistemą, matuojamas svirtelės poslinkis. Buvo atlikta keletas panašaus pobūdžio eksperimentų. Pirmojo eksperimento metu suspausto oro tiekimas buvo periodiškai išjungiamas ir įjungiamas, o slėgio reikšmė išlaikoma pastovi. Eksperimentas buvo pakartotas keletą kartų, naudojant skirtingo skersmens ortakius, skirtingas svirtes bei suspausto oro slėgius. Antrojo eksperimento metu suspausto oro slėgis buvo keičiamas nuo 0 iki 20 kPa žingsniu 1 kPa, eksperimento metu buvo matuojamas slėgis sistemos išėjime bei svirtelės poslinkis.

Statiniuose tyrimuose buvo naudojamos dviejų tipų svirtelės, pagrindinės jų charakteristikos pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Statiniuose tyrimuose naudotų svirtelių charakteristikos

Table 3.1. Characteristics of cantilevers used in research

Gamintojas ir modelis	Bruker, MLTC–D	Bruker, NCHV
Ilgis L , μm	225	117
Rezonansinis dažnis f , kHz	15	320
Standumas k , N/m	0,03	40
Storis t , μm	0,55	3,5
Plotis w , μm	20	33

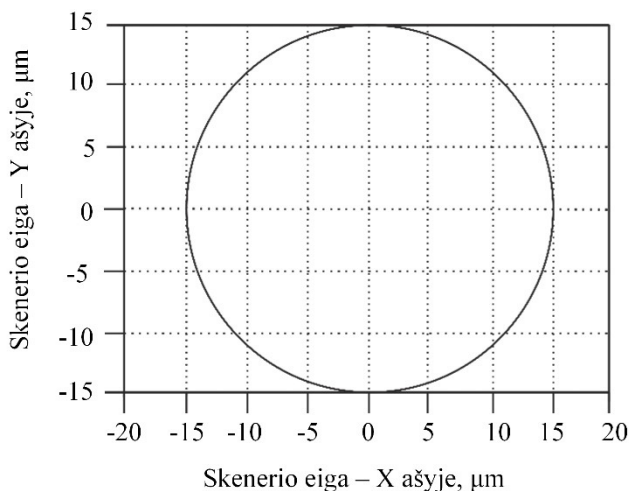
Pirmasis eksperimentas buvo atliktas su abiem svirtelėmis. MLTC-D svirtelės buvo naudojamos su 0,2 mm skersmens ortakiu, NCHV – su 0,4 mm ortakiu. Statinių tyrimų rezultatai pateikiami 3.3 poskyryje.

3.2.2. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio tikslumo tyrimų metodika

Atliekant dinامينius tyrimus taip pat buvo atlikti keli skirtingi eksperimentai.

Pirmojo eksperimento tikslas buvo AFM greitaveikos problemos identifikavimas ir vizualizavimas. Šiam tikslui pasiekti buvo panaudotas komercinis atominių jėgų mikroskopas BioScope II (Veeco Instruments Ltd, Santa Barbara, USA). Naudojant šį mikroskopą buvo skenuojami 2.16 paveiksle pavaizduoti bandiniai, kurių paviršiaus nelygumų periodas 1 μm . Eksperimento metu buvo stengiamasi nuskenuoti tą patį bandinio plotą skirtingais greičiais pradedant 1 linija/s ir baigiant 15 linijų/s, kai skenavimo plotas $2 \times 2 \mu\text{m}$. Buvo skenuojama kontaktiniu metodu, ore, naudojant svirtelę DNP-S/NP-S, kurios rezonansinis dažnis 65 kHz, standumas 0,35 N/m, viršūnės apvalinimo spindulys 10 nm.

Antrojo eksperimento metu buvo skenuojama kalibravimo gardelė APCS-0099, kurios paviršiaus nelygumų aukštis 240 nm, periodas 2 μm . Šiame eksperimente kalibravimo gardelė naudojama kaip etaloninis bandinys.



3.5 pav. Skenavimo trajektorija

Fig. 3.5. Scanning trajectory

Siekiant padidinti linijinį greitį tarp zondo ir bandinio paviršiaus iki tokio greičio, kad aerodinaminės jėgos efektas taptų pastebimas, buvo nuspręsta, jog bandinius tikslinga skenuoti apskritimine trajektorija panašiai kaip (Ulčinas, Vaitėkonis 2017). Skirtingai nei minėtame eksperimente, apskritimu judėjo pjezoelektrinis skaneris, o pats bandinys nebuvo sukamas apie savo ašį ir buvo skenuojamas ne visas paviršius, o tik viena linija. Skenavimo trajektorija pavaizduota 3.5. paveiksle. Toks sprendimas skenuojant 15 μm skersmens apskritimo lanką, leido pasiekti 847 $\mu\text{m/s}$ linijinį greitį tarp zondo ir paviršiaus bei turėti nuskenuotą 94,2 μm ilgio liniją.

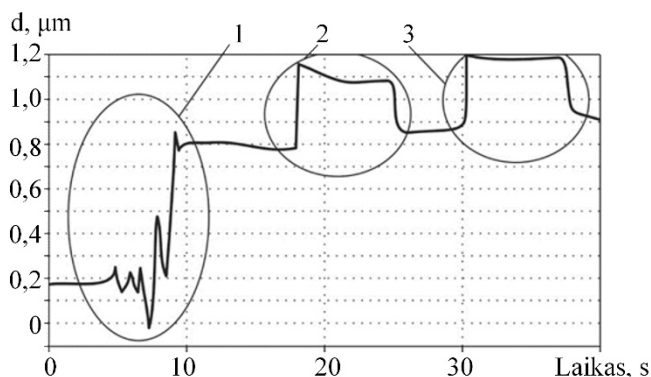
Eksperimentas buvo atliekamas automatiškai. Naudojant „Labview“ programinį paketą buvo sukurtas skenavimo trajektorijos generavimo failas, kuris leido pasirinkti skenuojamos trajektorijos dydį, skenavimo greitį ir jo kitimo žingsnį, pakartojimų skaičių. Atliekant eksperimentą, vieno matavimo metu buvo palaikomas pastovus suspausto oro slėgis, o greitis kito nuo 94,2 $\mu\text{m/s}$ iki 847 $\mu\text{m/s}$ žingsniu 94,2 $\mu\text{m/s}$. Trajektorija buvo skenuojama 3 kartus kiekvienu greičiu. Atlikus vieną matavimą, buvo keičiamas suspausto oro slėgis ir nekeičiant kitų parametrų vėl buvo kartojamas matavimas. Matavimai buvo atlikti kai suspausto oro slėgis buvo 0 kPa, 5 kPa, 6 kPa, 7 kPa, 9 kPa ir 12 kPa. Apibendrinti tyrimų rezultatai pateikiami 3.3 poskyryje.

3.3. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio tikslumo eksperimentinių tyrimų rezultatai

Šiame skyriuje pateikiami eksperimentinių tyrimų, atliktų pagal aukščiau aprašytą metodiką, rezultatai. Siekiant išsiaiškinti siūlomo AFM greitaveikos didinimo metodo pritaikomumą praktikoje, buvo atlikta keli tyrimai, kurių rezultatai pateikiami šiame poskyryje.

3.3.1. Svirtelę veikiančios aerodinaminės jėgos tyrimų rezultatai

Pirmojo statinio eksperimento tikslas buvo ištirti, kaip AFM jutiklio svirtelė reaguoja į suspausto oro srautą. Buvo siekiama AFM svirtelės padėti erdvėje suderinti taip, kad svirtelės paviršius atsirastų oro sraute. Tam, kad sukurta sistema tinkamai veiktų, reikėjo išpildyti šias sąlygas: oro srautas turi nežadinti svirtelės virpesių ir nesukelti triukšmų svirtelės poslinkio matavimo sistemoje. Pirmasis eksperimentas buvo atliktas su MLTC-D svirtelė, 0,2 mm skersmens ortakiu, suspausto oro slėgis buvo 30 kPa. Suderinus poslinkio matavimo sistemą, oro tiekimas buvo įjungiamas ir išjungiamas suformuojant 8 sekundžių trukmės impulsą. Išmatuota svirtelės poslinkio priklausomybė nuo laiko pateikta 3.6 paveiksle.



3.6 pav. Svirtelės poslinkių kreivė (Bučinskas *at al.* 2015)

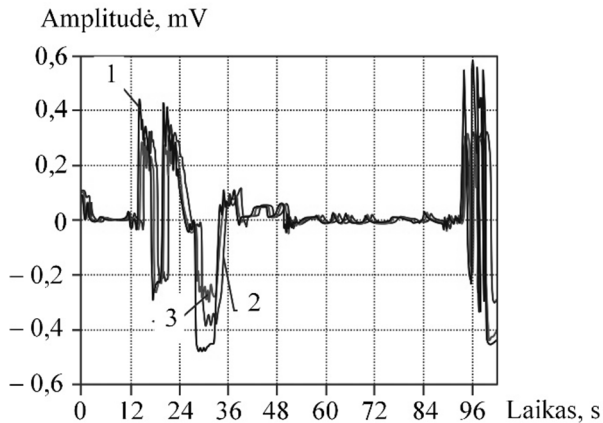
Fig. 3.6. Displacement amplitude of AFM cantilever tip (Bučinskas *at al.* 2015)

3.6 paveiksle pavaizduota kreivė sąlyginai gali būti padalinta į tris dalis. Pirmoje dalyje matomas poslinkio matavimo lazerinės sistemos derinimas. Antroje ir trečioje dalyje matoma svirtelės reakcija į suspausto oro srautą. Matome, jog oro srautas nesukelia pašalinių svirtelės virpesių, 30 kPa slėgis sukelia apie 0,3 μm svirtelės poslinkį, išjungus oro tiekimą svirtelė grįžta į savo pradinę padėtį. Šis eksperimentas parodė, jog siūlomas greita veikos didinimo metodas gali būti taikomas praktiškai, suspausto oro srautas nesukelia papildomų triukšmų lazerinėje matavimo sistemoje. Naudojant 0,2 mm skersmens ortakį buvo pastebėta, kad naudojant mažo skersmens ortakį yra pakankamai sudėtinga išspręsti svirtelės tvirtinimo ir pozicionavimo klausimą. Svirtelės pozicionavimas siekiant patalpinti ją į oro srovės centrą užima pakankamai daug laiko. Įvertinant tai bei teorinių tyrimų rezultatus, pateiktus antrame skyriuje, tolimesniuose tyrimuose nuspręsta naudoti 0,4 mm skersmens ortakį.

Pagaminus svirtelės laikiklį su 0,4 mm ortakiais buvo pakartotas aukščiau aprašytas eksperimentas. Šio bandinio metu buvo naudojama NCHV svirtelė. Dėl padidėjusio ortakio skersmens šio bandymo metu buvo naudojamas mažesnis suspausto oro slėgis. Šis eksperimentas buvo atliktas naudojant 5 kPa, 8 kPa ir 10 kPa slėgius, užduodant du ilgesnius ir tris pakankamai trumpus impulsus. Išmatuotos svirtelės poslinkių kreivės pateiktos 3.7 paveiksle.

Iš 3.7 paveiksle pateiktų kreivių matome, jog naudojant 0,4 mm skersmens ortakį, NCHV svirtelė reaguoja analogiškai kaip ir pirmuoju atveju. Lyginant 3.7 paveiksle pavaizduotas kreives matome, jog svirtelės poslinkis proporcingas suspausto oro slėgiui. Šių statinių eksperimentų rezultatai įrodo, jog AFM svirtelės reaguoja į suspausto oro srautą, o sukiamas efektas gali būti valdomas kei-

čiant suspausto oro slėgį. Taigi šie eksperimentai patvirtino teorinių tyrimų rezultatus, jog svirtelės dinaminės charakteristikos gali būti valdomos nekontaktiniu būdu, naudojant suspausto oro srautą.



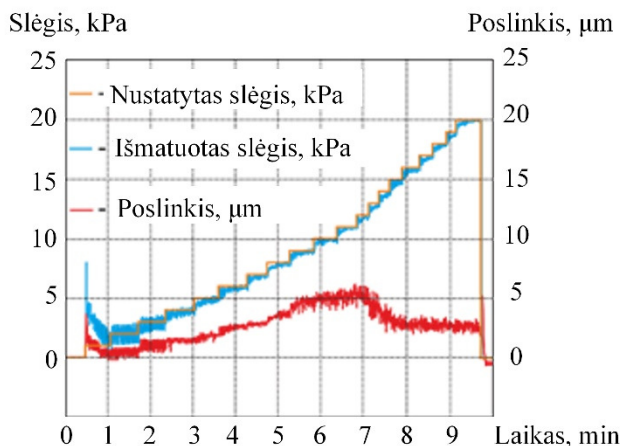
3.7 pav. Svirtelės poslinkių kreivės: 1) – 10 kPa slėgis; 2) – 8 kPa slėgis; 3) – 5 kPa slėgis,

Fig. 3.7. Displacement amplitude of cantilever tip: 1) – air pressure 10 kPa; 2) – air pressure 8 kPa; 3) – air pressure 5 kPa

Siekiant detaliau ištirti svirtelę veikiančias aerodinamines jėgas, buvo atliktas dar vienas panašus eksperimentas, kurio metu suspausto oro slėgis buvo keičiamas nuo 0 iki 20 kPa žingsniu 1 kPa. Šiame eksperimente taip pat buvo naudojama NCHV svirtelė. Siekiant priartinti eksperimentą prie realaus skenavimo sąlygų bei išsiaiškinti, ar bandinių savybės neturės įtakos aerodinaminėms jėgoms, eksperimentų metų 8 μm atstumu po zondų buvo padėtas bandinys. Suspausto oro slėgis buvo valdomas rankiniu būdu, slėgiui pasiekus nustatytą reikšmę, jis iš karto buvo padidinamas 1 kPa. Eksperimento rezultatai pateikiami 3.8 paveiksle.

Iš 3.8 paveikslo matome, jog didinant suspausto oro slėgį nuo 0 kPa iki 12 kPa, svirtelės poslinkis didėja proporcingai nuo 0 iki 5 μm . Slėgiui didėjant nuo 12 kPa iki 15 kPa, svirtelės poslinkis pradeda mažėti ir pasiekia 3 μm . Toliau didinant slėgį iki 20 kPa, poslinkis nebedidėja ir išlieka pastovus – 3 μm . Nutraukus suspausto oro tiekimą, svirtelė grįžta į pradinę padėtį. Efektą, kai didinant oro slėgį pradeda mažėti svirtelės poslinkis, galima paaiškinti tuo, kad esant pakankamam oro debitui, sistemoje susiformuoja dvi aerodinaminės jėgos: pirmoji jėga veikia svirtelės viršutiniame paviršiuje ir spaudžia ją žemyn; antroji jėga susidaro tarp bandinio paviršiaus ir svirtelės apatinio paviršiaus, šios jėgos kryptis yra prie-

šinga prispaudimo jėgai. Padidėjus oro srauto debitui keliamosios jėgos efektyvumas pradeda didėti ir tuomet ji iš dalies kompensuoja prispaudimo jėgos poveikį. Šis efektas neturės žymaus poveikio siūlomo AFM greitaveikos didinimo metodo efektyvumui, kadangi jis pasireiškia prie sąlyginai didelių slėgių, kurie sukelia žymius svirtelės poslinkius. Skenavimo procese tokio slėgio naudojimas sukeltų nepageidaujamą sąveikos jėgos padidėjimą tarp zondo ir bandinio paviršiaus. Tolimesni eksperimentai buvo atliekami naudojant oro slėgių intervalą nuo 0 kPa iki 12 kPa. Šis slėgių intervalas gali pasislinkti į vieną ar kitą pusę, priklausomai nuo svirtelės standumo ir jos paviršiaus ploto.



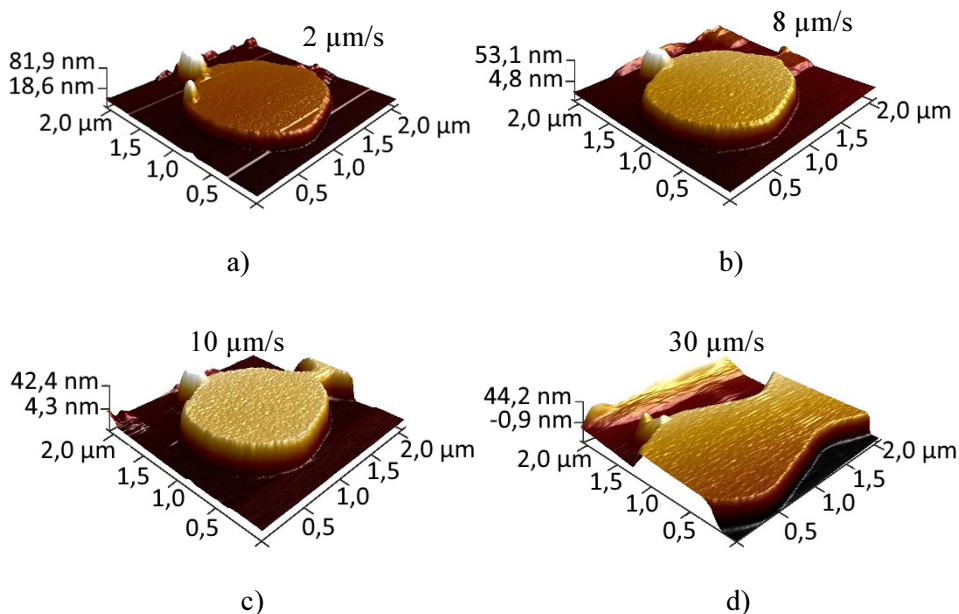
3.8 pav. Svirtelės poslinkių priklausomybė nuo suspausto oro slėgio
Fig. 3.8. Dependency of cantilever displacement on pressure of the compressed air

Atlikti eksperimentiniai statiniai tyrimai patvirtino prielaidą, jog svirtelės standumo charakteristikos gali būti valdomos naudojant suspausto oro srautą. Eksperimentai patvirtino siūlomo metodo universalumą: skirtingos AFM svirtelės panašiai reaguoja į aerodinamines jėgas, o norimas aerodinaminės jėgos efektas gali būti pasiekiamas preciziškai reguliuojant suspausto oro slėgį. Toliau darbe yra aprašomi atlikti dinaminiai tyrimai ir pateikiami jų rezultatai.

3.3.2. Atominių jėgų mikroskopo modifikuoto jutiklio tikslumo tyrimų rezultatai

Kaip jau buvo minėta 3.2 poskyryje, buvo atliekami keli dinaminiai tyrimai, kurių metu buvo skenuojamas bandinių paviršius. Pirmasis eksperimentas buvo atliktas naudojant komercinį AFM BioScope II (Veeco Instruments Ltd, Santa Barbara,

USA). Naudojant šį mikroskopą buvo nuskenuoti bandiniai, kurių paviršiaus nelygumų periodas $1\ \mu\text{m}$ (2.16 pav.). Eksperimento metu buvo stengiamasi nuskenuoti tą patį bandinio plotą skirtingais greičiais pradedant $1\ \text{linija/s}$ ($2\ \mu\text{m/s}$) ir baigiant $15\ \text{linijų/s}$ ($15\ \mu\text{m/s}$). Kiekvieno skenavimo metu didinant greitį $1\ \text{linija/s}$. Šio eksperimento tikslas – identifikuoti ir vizualizuoti AFM greitaveikos problemą. Apibendrinti eksperimento rezultatai grafinėje formoje pateikiami 3.9 paveiksle.



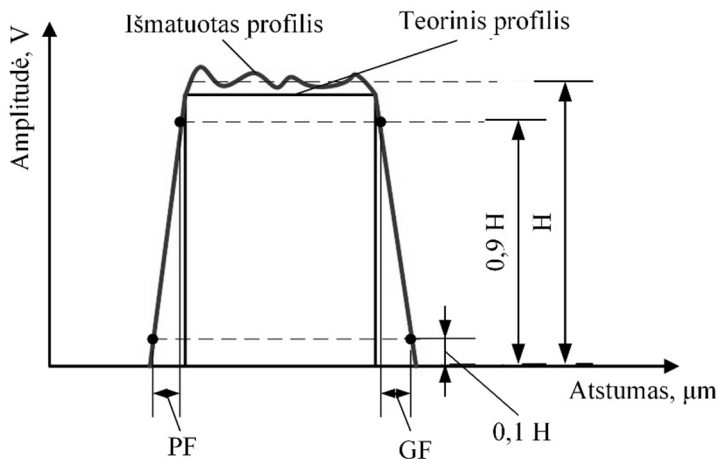
3.9 pav. Vieno bandinio skenavimo skirtingais greičiais rezultatai: a) – skenavimo greitis $2\ \mu\text{m/s}$; b) – skenavimo greitis $8\ \mu\text{m/s}$; c) – skenavimo greitis $10\ \mu\text{m/s}$; d) – skenavimo greitis $30\ \mu\text{m/s}$;

Fig. 3.9. Results of scanning same sample at different speeds: a) – scanning speed $2\ \mu\text{m/s}$; b) – scanning speed $8\ \mu\text{m/s}$; c) – scanning speed $10\ \mu\text{m/s}$; d) – scanning speed $30\ \mu\text{m/s}$;

Iš 3.9 paveikslo matome, jog skenuojant didele skiriamąja geba net ir sąlyginai nedideliais greičiais $8\ \mu\text{m/s}$ – $30\ \mu\text{m/s}$ pasireiškia efektai, sukeliantys matavimo paklaidas. 3.9 a paveiksle matomas nuskenuotas vienas periodinės struktūros elementas, tuo tarpu padidinus skenavimo greitį iki $10\ \mu\text{m/s}$ (3.9 c pav.) matome vaizdą, kur elementas yra tarsi sujungtas su gretimu iškilimu, o dar padidinus skenavimo greitį (3.9 d pav.), šis efektas dar sustiprėja. Analizuodami gautus rezultatus galime teigti, jog dėl nepakankamo svirtelės standumo, per mažo skenerio z ašies arba grįžtamojo ryšio greičio, zondas nespėja pasiekti paviršiaus

įdubimo dugno, o AFM programinė įranga nufiltruoja svirtelės virpesius sukurdamą lygaus paviršiaus vaizdą. Tikėtina, jog visais šiais atvejais aerodinaminės jėgos panaudojimas sukeltų teigiamą efektą ir leistų padidinti skenavimo greitį.

Antras eksperimentas buvo atliktas naudojant VMTI FTMC turimą AFM prototipą, kuriam buvo pagamintas specialus svirtelės laikiklis su instaliuotu ortakiu. Eksperimentas buvo atliekamas naudojant NCHV svirtelę, eksperimento metodika pateikta 3.2 poskyryje. Šis eksperimentas atliktas skenuojant kalibravimo gardelę APCS-0099. Nuspręsta naudoti kalibravimo gardelę, nes prieš tai atliktas eksperimentas parodė, jog pagamintų bandinių forma nėra ideali, tai apsunkina gautų rezultatų apdorojimą, ypač rezultatų skaitinių parametrų vertinimą. Kalibravimo gardelės skenavimo rezultatai, gauti naudojant įvairius greičius ir skirtingus suspausto oro slėgius, buvo vertinami pagal tris parametrus (3.10 pav.)



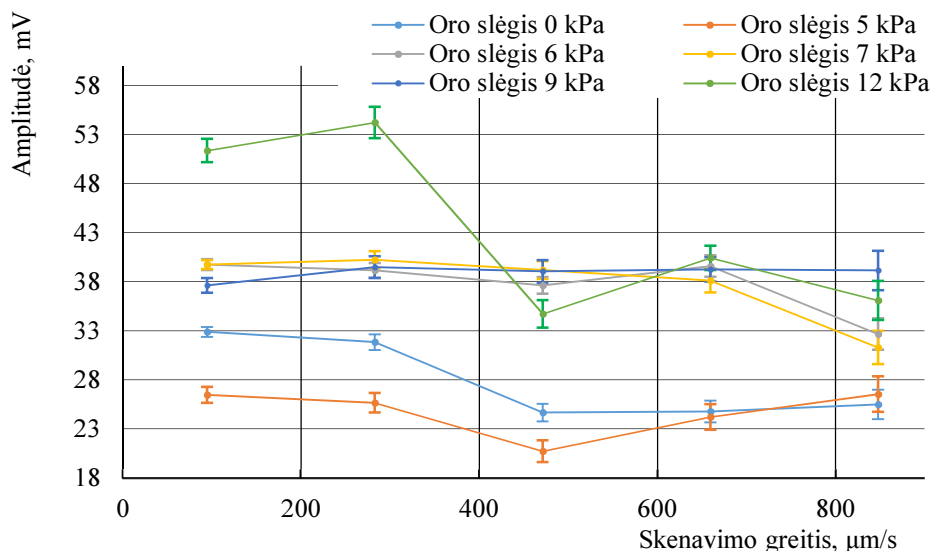
3.10 pav. Eksperimento rezultatų vertinimo schema

Fig. 3.10. Scheme of experimental results evaluation

Eksperimento rezultatai vertinami lyginant išmatuotą struktūros aukštį H , signalo priekinio fronto statumą PF ir signalo galinio fronto statumą GF . Amplitudžių palyginimas leidžia nustatyti pokyčius vertikaliajoje ašyje, atsirandančius dėl pasikeitusio skenavimo greičio ir pridėtos aerodinaminės jėgos. Signalų priekinio ir galinio fronto statusas vertinamas remiantis prielaida, jog teorinis paviršius (kalibravimo gardelės) yra idealiai status, t. y. kuo statesnis signalo frontas, tuo mažesnė AFM paklaida horizontaliojoje ašyje. Vertinami abu signalo frontai siekiant ištirti, kokią poveikį pridėta aerodinaminė jėga turės, kai skenuojant svirtelė kyla ant „laiptelio“ ir kai nuo jo leidžiasi.

Siekiant užtikrinti matavimo duomenų patikimumą, pagal aprašytą metodą buvo vertinami 5 laisvai pasirenkami „laipteliai“ iš kreivių, gautų skenuojant kalibravimo gardelę 3.2 poskyryje nurodytomis sąlygomis. Pradinėje rezultatų apdorojimo stadijoje buvo naudojamas programinis paketas „OriginPro 8.0“. Parametrai PF ir GF nustatyti naudojant „OriginPro 8.0“ įrankį „rise/fall“, skirtą signalų frontų analizei. Gautų duomenų statistinis apdorojimas atliktas naudojant programinį paketą „Microsoft Office 2016“.

Amplitudžių (H) palyginimo rezultatai grafinėje formoje pateikti 3.11 paveiksle.



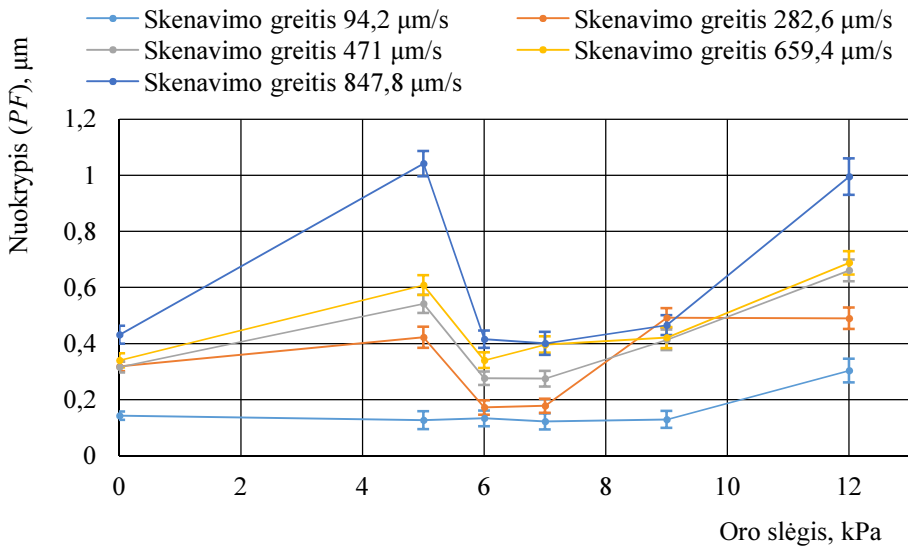
3.11 pav. Išmatuotų amplitudžių palyginimas
Fig. 3.11. Comparison of measured amplitudes

Iš 3.11 paveikslo, kuriame pateiktos išmatuotos amplitudžių dydžio priklausomybės nuo skenavimo greičio, matome, kad naudojant suspausto oro srautą amplitudės padidėjo visais atvejais, išskyrus atvejus, kai oro slėgis buvo 5 kPa ir skenavimo greitis neviršijo 650 $\mu\text{m/s}$. Gautos nevienodos amplitudžių reikšmės gali būti paaiškintos tuo, jog naudojant suspausto oro srautą sumažėja svirtelės atšokimas „laiptelio“ pradžioje bei tuo, kad zondas greičiau nusileidžia ir tiksliau pamatuoja paviršių „laiptelio“ apačioje. Hipotezę, jog zondas ne visada spėja nusileisti iki „laiptelio“ apačios, patvirtina priklausomybė tarp amplitudės ir skenavimo greičio, kai nenaudojama aerodinaminė jėga (3.11 pav.): skenavimo greičiui padidėjus iki 450 $\mu\text{m/s}$, amplitudės reikšmė sumažėja nuo 33 mV iki 25 mV ir

toliau didėjant greičiui išlieka nepakitusi. Tai rodo, jog esant tokiam greičiui pasiekiamą ribą, kuomet neužtenka grįžtamojo ryšio arba pjezo skenerio z ašies pavaros greičio tinkamai reaguoti į paviršiaus nelygumus bei pasireiškia efektas, kai dėl didelio greičio zondas nebespėja nusileisti iki „laiptelio“ apačios. Amplitudės sumažėjimas, kai naudojamas 5 kPa slėgio suspausto oro srautas, paaiškinamas tuo, jog esant tokioms skenavimo sąlygoms oro srauto poveikis yra nepakankamai efektyvus, nes dėl per mažo srauto ir skenavimo greičio skenuojamo paviršiaus nelygumuose formuojasi „oro pagalvės“, kurios trukdo zondui pasiekti bandinio paviršių. Šis efektas pradeda silpnėti skenavimo greičiui viršijus 450 $\mu\text{m/s}$ ribą, o greičiui pasiekus 840 $\mu\text{m/s}$ reikšmę išmatuota amplitudė gaunama 1 mV didesnė esant pridėtai aerodinaminei jėgai lyginant su nepridėta jėga. Tikėtina, jog esant galimybei dar labiau didinti skenavimo greitį, pasireikštų teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis net ir naudojant 5 kPa oro slėgį. Stabiliausios amplitudžių reikšmės gaunamos, kai naudojamo suspausto oro slėgiai yra 6 kPa ir 7 kPa. Esant tokiems slėgiams, amplitudės sumažėjimas pasireiškia skenavimo greičiui viršijus 650 $\mu\text{m/s}$ ribą. Amplitudžių padidėjimas nuo 33 mV iki 40 mV, kai yra pridėta aerodinaminė jėga, paaiškinamas tuo, kad dėl atsiradusios papildomos jėgos zondas tiksliau skenuoja paviršių įdubimuose ir pasiekia jų dugną. Naudojant 9 kPa slėgio srautą, anksčiau aptartiems atvejams būdingas amplitudės sumažėjimas nepastebimas. Priešingai, skenavimo greičiui didėjant nuo 100 $\mu\text{m/s}$ iki 300 $\mu\text{m/s}$ pastebimas amplitudės padidėjimas nuo 38 mV iki 40 mV. Tai paaiškinama tuo, jog esant tokiam slėgiui prie mažų skenavimo greičių, analogiškai kaip ir naudojant 5 kPa slėgį, bandinio paviršiaus įdubimuose susidaro keliamoji aerodinaminė jėga, trukdanti zondui pasiekti bandinio paviršių. Šią hipotezę patvirtina amplitudės pokyčių kreivė esant 12 kPa oro srauto slėgiui. Didelis taškų išsibarstymas rodo, jog šiuo atveju oro srauto sukeltas efektas yra labai nestabilus. Tikėtina, jog šiuo atveju oro slėgis yra per didelis ir gaunamas analogiškas efektas, kuris buvo gautas atliekant statinius tyrimus (3.8 pav.). Apibendrinant 3.9 paveiksle pateiktus rezultatus galima teigti, jog vertinant išmatuotą amplitudės dydį (H) teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis skenavimo greičių intervale nuo 100 $\mu\text{m/s}$ iki 650 $\mu\text{m/s}$ pastebimas, kai suspausto oro slėgis yra 6–7 kPa. Greičių intervale nuo 300 $\mu\text{m/s}$ iki 840 $\mu\text{m/s}$ pastebimas teigiamas 9 kPa slėgio suspausto oro srauto poveikis.

Išmatuotų struktūros nelygumų aukščio palyginimas leidžia spręsti tik apie aerodinaminės jėgos įtaką skenuojant pakankamai lygias struktūras, kai kontakto praradimo tarp zondo ir bandinio paviršiaus tikimybė yra nedidelė. Aerodinaminės jėgos įtaką skenuojant struktūras su staigiais paviršiaus topologijos pokyčiais leidžia įvertinti parametrai PF ir GF (3.10 pav.).

Parametro (PF), apibūdinančio priekinio signalo fronto statumą, priklausomybės nuo skenavimo greičio ir suspausto oro slėgio pateiktos 3.12 paveiksle.

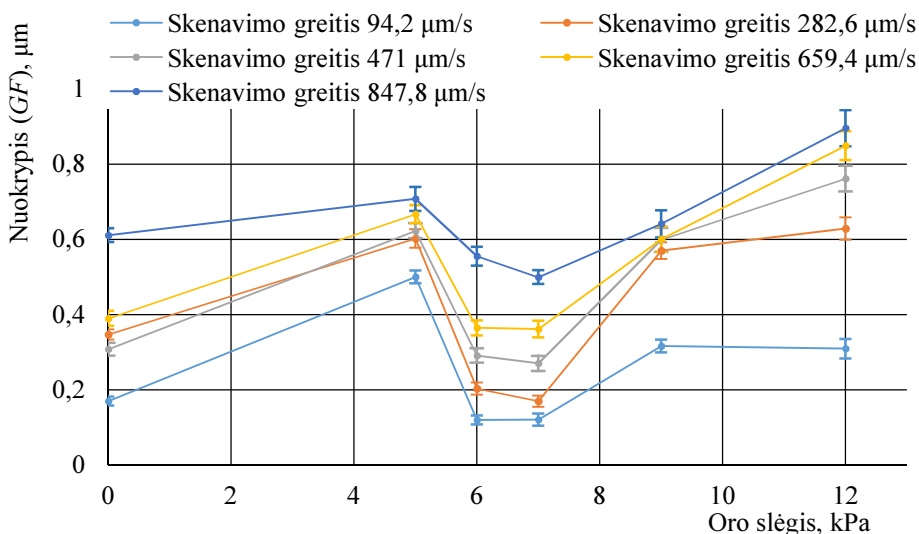


3.12 pav. Parametro PF priklausomybė nuo skenavimo greičio ir oro slėgio
Fig. 3.12. Dependencies of parameter PF on scanning speed and pressure of the compressed air

Kreivės, pavaizduotos 3.12 paveiksle apibūdina aerodinaminės jėgos efektą skenuojant nevienodo aukščio struktūras, kai zondas turi pakilti ant aukšto „laiptelio“. Mažiausia nuokrypa ir stačiausias laiptelis gaunamas skenuojant 94 μm/s greičiu. Šiuo atveju aerodinaminės jėgos poveikis pasireiškia tik viršijus 9 kPa slėgį ir yra neigiamas, nes nuokrypis padidėja. Tai paaiškinama tuo, kad didelis slėgis padidina svirtelės prispaudimo jėgą, kuri trukdo svirtelei pakilti ant laiptelio. Didėjant skenavimo greičiui, analogiškai kaip ir 3.11 paveiksle pavaizduotu atveju, pastebimas suspausto oro slėgių intervalas, kuomet matomas teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis. Skenavimo greičiui padidėjus iki 282 μm/s ir oro slėgiui esant 6–7 kPa, nuokrypis sumažėja nuo 0,31 μm iki 0,17 μm, lyginant su atveju, kai nenaudojamas suspausto oro srautas. Skenavimo greičiui esant 471 μm/s, nuokrypis sumažėja nuo 0,31 μm iki 0,27 μm. Papildomai didinant skenavimo greitį, nuokrypis mažėja nuo 0,35 μm iki 0,34 μm ir nuo 0,43 μm iki 0,41 μm. Aerodinaminės jėgos poveikio sumažėjimas šiais atvejais paaiškinamas padidėjusiomis svirtelės inercijos jėgomis. Apibendrinant 3.10 paveiksle pateiktus rezultatus, galima teigti, jog suspausto oro slėgiui esant intervale nuo 6 kPa iki 7 kPa, pastebimas teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis skenuojant visais eksperimente tirtais greičiais. 5 kPa, 9 kPa ir 12 kPa slėgio naudojimas tirtais atvejais

padidina nuokrypius (PF), tai paaiškinama per mažą oro srauto greitį, kai naudojamas 5 kPa slėgis ir per dideliu suspausto oro debitu, kai naudojami 9 kPa ir 12 kPa oro slėgiai.

Paveiksluose 3.11 ir 3.12 pateikti rezultatai leidžia teigti, kad aerodinaminės jėgos panaudojimas sukelia teigiamą efektą ir sudaro prielaidas padidinti AFM skenavimo greitį. Tačiau siekiant visapusiškai įvertinti šį efektą, būtina atsižvelgti ir į parametą GF , kuris nusako signalo galinio fronto statumą. Parametro GF priklausomybės nuo skenavimo greičio ir naudojamo suspausto oro slėgių pateikiamos 3.13 paveiksle.



3.13 pav. Parametro GF priklausomybė nuo skenavimo greičio ir oro slėgio
Fig. 3.13. Dependencies of parameter GF on scanning speed and pressure of the compressed air

Iš paveikslo 3.13 matome, kad vertinant parametą GF , analogiškai kaip ir 3.11, 3.12 paveiksluose pavaizduotais atvejais, galima išskirti suspausto oro slėgio intervalus, kuriuose teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis pastebimas skenuojant visais tirtais greičiais. Teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis pastebimas, kai suspausto oro slėgis yra nuo 6 kPa iki 7 kPa. Šiuo atveju nuokrypis sumažėja nuo 0,18 μm iki 0,11 μm, kai skenavimo greitis yra 94 μm/s, greičiui padidėjus iki 280 μm/s nuokrypis mažėja nuo 0,34 μm iki 0,2 μm, lyginant su atveju, kai nenaudojamas suspausto oro srautas. Dar labiau didinant skenavimo greitį, nuokrypio mažėjimo tendencija išlieka, bet skaitinė vertė sumažėja. Skenavimo greičiui esant 470 μm/s ir 670 μm/s, nuokrypio reikšmė mažėja nuo 0,32 μm

iki $0,27\ \mu\text{m}$ ir atitinkamai nuo $0,39\ \mu\text{m}$ iki $0,36\ \mu\text{m}$. Didinant greitį iki $847\ \mu\text{m/s}$, nuokrypio reikšmė sumažėja nuo $0,61\ \mu\text{m}$ iki $0,49\ \mu\text{m}$. Aerodinaminės jėgos poveikio sumažėjimas paaiškinamas tuo, jog šiais atvejais pasireiškia kitų AFM elementų įtaka skenavimo kokybei. Naudojant $5\ \text{kPa}$, $9\ \text{kPa}$ ir $12\ \text{kPa}$ oro slėgius pastebimas analogiškas efektas kaip ir 3.11 , 3.12 paveiksluose pavaizduotais atvejais.

Apibendrinant eksperimentinių tyrimų rezultatus galima teigti, jog aerodinaminės jėgos poveikis yra eksperimentiškai įvertintas. Skenuojant kalibravimo gardelę visais bandytais greičiais, teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis pasireiškia esant $6\text{--}7\ \text{kPa}$ suspausto oro slėgiui ir vertinant visus 3 analizuotus parametrus.

Eksperimentiniai tyrimai patvirtina modeliavimo rezultatus, jog siūlomas AFM greitaveikos didinimo metodas yra efektyvus. Pagal tiriamos struktūros tipą parinkus tinkamas oro slėgio reikšmes, sudaromos sąlygos, leidžiančios didinti AFM skenavimo greitį bei pagerinti rezultatų kokybę.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Eksperimentais patvirtinta, jog siūlomas metodas leidžia valdyti AFM jutiklio svirtelės charakteristikas naudojant suspausto oro srautą.

2. Nustatyta, jog naudojant NCHV AFM jutiklio svirtelę teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis gaunamas esant oro slėgiui nuo $1\ \text{kPa}$ iki $12\ \text{kPa}$, kai naudojamas ortakis, kurio vidinis skersmuo $0,4\ \text{mm}$.

3. Eksperimentais patvirtinta teorinių tyrimų metu suformuluota prielaida, jog aerodinaminės jėgos poveikis priklauso ne tik nuo oro slėgio, atstumo nuo ortakio galo iki viršutinio svirtelės paviršiaus, bet ir nuo skenuojamo paviršiaus nelygumų dydžio ir tipo.

4. Eksperimentinių tyrimų metu patvirtinta hipotezė, jog didėjant skenavimo greičiui blogėja matavimo rezultatai; nustatyta, jog skenuojant didele skiriamąja geba net sąlyginai nedideliais greičiais (šiuo atveju $20\ \mu\text{m/s}$, $30\ \mu\text{m/s}$) pasireiškia dinaminiai efektai, sukeliantys matavimo nuokrypas.

5. Įvertintas siūlomo metodo efektyvumas. Vertinant 3 pasirinktus parametrus nustatyta, jog skenuojant kalibravimo gardelę teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis gaunamas naudojant oro slėgį nuo $6\ \text{kPa}$ iki $7\ \text{kPa}$.

6. Atliktų bandymų rezultatai patvirtina prielaidas, jog aerodinaminės jėgos labiausiai pasireiškia skenuojant bandinius su staigiais paviršiaus nelygumų aukščio pokyčiais, o dėl pridėtos netiesinės aerodinaminės jėgos didžiausias poveikis, tenka galiniam signalo frontui (kai svirtelė leidžiasi nuo stataus „laiptelio“). Skenuojant $94\ \mu\text{m/s}$ greičiu, nuokrypis GF sumažėja nuo $0,18\ \mu\text{m}$ iki $0,11\ \mu\text{m}$.

7. Eksperimentinių tyrimų rezultatuose matomos nuokrypių PF ir GF mažėjimo tendencijos sudaro prielaidas teigti, jog esant techninėms galimybėms skenavimo greitį didinti daugiau negu iki $847 \mu\text{m/s}$, turėtų išlikti teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis.

Bendrosios išvados

1. Atlikus mokslinės literatūros apžvalgą, nustatyta, jog aktualiu AJM technologijos iššūkiu išlieka skenavimo greitaveika, kurią riboja AFM jutiklio dinaminės savybės ir pastarųjų valdymo galimybės.

2. Sudarytas modernizuotą AFM jutiklį aprašantis matematinis modelis, leidžiantis įvertinti AFM jutiklio svirtelės dinaminį atsaką skenuojant skirtingų savybių bandinių paviršius įvairiais greičiais ir naudojant papildomą valdymo poveikį. Modelio adekvatumas įvertintas tarpusavyje palyginus modeliavimo ir eksperimento rezultatus. Skenuojant kalibravimo gardelę, skirtumas tarp modelio ir eksperimento rezultatų neviršija 6,5 %.

3. Atlikti teoriniai tyrimai patvirtino siūlomo AFM greitaveikos didinimo metodo efektyvumą. Modeliavimo rezultatai rodo, jog priklausomai nuo naudojamos svirtelės tipo skenavimo greitis gali būti didinamas mažiausiai 10 kartų, jei tą leidžia naudojama tyrimų įranga.

4. Sukurtas eksperimentinis tyrimų stendas, skirtas AFM jutiklio charakteristikoms tirti, leidžiantis pasiekti didesnę negu 847,6 $\mu\text{m/s}$ skenavimo greitį kontaktiniame režime bei valdyti suspausto oro slėgį nuo 0,5 iki 50 kPa.

5. Atlikti eksperimentiniai bandymai įrodo, jog įvairių AFM jutiklio svirtelės standumas gali būti valdomas naudojant siūlomą greitaveikos didinimo metodą. Teigiamas aerodinaminės jėgos poveikis visiems vertinamiems parametrams pasireiškia kai suspausto oro slėgis yra 6–7 kPa. Nustatyta, jog aerodinaminės jėgos

naudojimas turi didžiausią įtaką parametrai GF , nusakančiam nuskenuoto paviršiaus nuokrypį nuo realaus mėginio horizontalioje ašyje zondui leidžiantis žemyn. Esant suspausto oro slėgiui 7 kPa bei skenavimo greičiui 847,6 $\mu\text{m/s}$, šis nuokrypis sumažėja 120 ± 18 nm lyginant su atveju, kai nenaudojamas suspausto oro srautas.

Literatūra ir šaltiniai

Abbasi, M.; Mohammadi, A. K. 2010. A new model for investigating the flexural vibration of an Atomic force microscope cantilever, *Ultramicroscopy* 110: 1374–1379.

Adams, J. D.; Erickson, B. W.; Grossenbacher, J.; Brugger, J.; Nievergelt, A.; Fantner, G. F. 2016. Harnessing the damping properties of materials for high-speed atomic force microscopy, *Nature Nanotechnology* 11: 147–151.

Agmon, L.; Shahar, I.; Yosufov, D.; Pimentel, C.; Pina, C. M.; Gnecco, E.; Berkovich, R. 2018. Estimation of interaction energy and contact stiffness in atomic-scale sliding on a model sodium chloride surface in ethanol, *Scientific reports* 8(1): 4681–4689.

Andriukonis, E.; Stirke, A.; Garbaras, A.; Mikoliunaite, L.; Ramanaviciene, A.; Remeikis, V.; Ramanavicius, A. 2018. Yeast-assisted synthesis of polypyrrole: Quantification and influence on the mechanical properties of the cell wall, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 164: 224–231.

Arinero, R.; Leveque, G. 2003. Vibration of the cantilever in Force Modulation Microscopy analysis by a finite element model, *Review of scientific instruments* 74: 104–110.

Augustaitis, V. K.; Gichan, V.; Sheshok, N.; Iljin, I. 2011. Computer-aided generation of equations and structural diagrams for simulation of linear stationary mechanical dynamic systems, *Mechanika* 17: 255–263.

Bahrami, M. R.; Abeygunawardana, A. B. 2018. Modeling and Simulation of Tapping Mode Atomic Force Microscope Through a Bond-Graph, in *Advances in Mechanical Engineering* 9–15.

Belikov, S.; Magonov, S. 2011. Tip-sample interaction force modeling for AFM simulation, control design, and material property measurement, in *American control conference*, 2867–2872. San Francisco, CA, USA.

Binnig, G.; Quate, C. F.; Gerber, C. 1986. Atomic-Force Microscope, *Physical review letters* 56: 930–933.

Bloo, M. L.; Haitjema, H.; Pril, W.O. 1999. Deformation and wear of pyramidal, silicon-nitride AFM tips scanning micrometre-size features in contact mode, *Measurement* 25: 203–211.

Boisen, A.; Hansen, O.; Bouwstra, S. 1996. AFM probes with directly fabricated tips, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 6(1): 58–63.

Bozchalooi, I. S.; Houck, A. C.; AlGhamdi, J. M.; Toumi, K. Y. 2016. Design and control of multi-actuated atomic force microscope for large-range and high-speed imaging, *Ultra-microscopy* 160: 213–224.

Butt, H. J.; Cappella, B.; Kappl, M. 2005. Force measurements with the atomic force microscope technique, interpretation and applications, *Surface Science Reports* 59: 1–152.

Cai, j.; Xia, Q.; Luo, Y.; Wang, Y. M.; Zhang, L. 2015. Optimal design and evaluation of cantilever probe for multifrequency Atomic force microscopy, in *11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimisation*, 1–5. Sydney, Australia.

Caruntu, D. I. 2009. Dynamic modal characteristics of transverse vibrations of cantilevers of parabolic thickness, *Mechanics research communications* 36: 391–404.

Chang, W. J.; Fang, T. H.; Chou, H. M. 2003. Effect of interactive damping on sensitivity of vibration modes of rectangular AFM cantilevers, *Physics Letters* 312: 158–165.

Chang, W. J.; Lin, C. M.; Lee, J. F.; Lin, S. L. 2005. Determination of damping force between atomic force microscope tips and sample using an inverse methodology, *Physics letters* 343: 79–84.

Chih-Wen, Y.; Ing-Shouh, H.; Chen, Y. F.; Chia, S. C.; Din, P. T. 2007. Imaging of soft matter with tapping-mode atomic force microscopy and non-contact mode atomic force microscopy, *Nanotechnology* 18: 1–8.

Choi, J. L.; Gethin, D. T. 2009. Simulation of atomic force microscopy operation via three-dimensional finite element modelling, *Nanotechnology* 20: 121–135.

Chung, K. H. 2014. Wear Characteristics of Atomic Force Microscopy Tips: A Review. *International journal of precision engineering and manufacturing* 15(10): 2219–2230.

Chung, K. H.; Lee, Y. H.; Kim, D. E. 2005. Characteristics of fracture during the approach process and wear mechanism of a silicon AFM tip, *Ultramicroscopy* 102: 161–171.

Claeysen, J. R. 2010. The Timoshenko beam model in vibrating afm cantilevers, in *Proceedings of the 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications*, 60–69. Serra Negra.

Claeysen, J. R.; Tsukazan, T.; Tonetto, L.; Tolfo, D. 2013. Modeling the tip-sample interaction in atomic force microscopy with Timoshenko beam theory, *Nanoscale Systems MMTA* 2: 124–144.

Colac, R. 2009. An AFM study of single-contact abrasive wear: The Rabinowicz wear equation revisited, *Wear* 267: 1772–1776.

Coskun, M. B.; Alemansour, H.; Fowler, A. G.; Maroufi, M.; Moheimani, S. R. 2018. Q Control of an active AFM cantilever with differential sensing configuration, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 99: 1–8.

Daeinabi, K.; Korayem, M. H. 2011. Dynamics analysis of the AFM manipulator-sample interaction using nano-contact mechanics models, in *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 910–915. Beijing, China.

Degiampietro, K.; Colac, R. 2007. Nanoabrasive wear induced by an AFM diamond tip on stainless steel, *Wear* 263: 1579–1584.

Espinoza-Beltran, F. J.; Geng, K.; Munoz Saldana, J.; Rabe, U.; Hirsekorn, S.; Arnold, W. 2009. Simulation of vibrational resonances of stiff AFM cantilevers by finite element methods, *New Journal of Physics* 11. [Online], [cited date 2016-05-14]. Available from internet: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/11/8/083034/pdf>

Farooquit, M. M.; Evanst, A. G. R.; Stedmans, M.; Haycocks, J. 1992. Micromachined silicon sensors for atomic force microscopy, *Nanotechnology* 3: 91–97.

Fairbairn, M. W.; Reza Moheimani, S. O. 2013. Control techniques for increasing the scan speed and minimizing image artifacts in Tapping-Mode Atomic Force microscopy, *IEEE Control systems magazine* 46–67.

Fleming, B. J.; Kenton, A. J.; Leang K. K. 2010. Bridging the gap between conventional and video-speed scanning probe microscopes, *Ultramicroscopy* 110: 1205–1214.

Florin, E. L.; Radmacher, M.; Fleck, B.; Gaub, H. E. 1994. Atomic force microscope with magnetic force modulation, *Review of Scientific Instruments* 65(3): 639–643.

Gianangelo, B.; Bodil, H. 2013. Surface science techniques. Springer, Science and Business media, 662 p.

Giessibl, F. J.; Trafas, B. M. 1994. Piezoresistive cantilevers utilized for scanning tunneling and scanning force microscope in ultrahigh vacuum, *Review of Scientific Instruments* 65: 1923–1929.

Göddenhenrich, T. 1990. Force microscope with capacitive displacement detection, *Journal of Vacuum Science and Technology* 8: 383–387.

Glover, C. C.; Killgore, J. P.; Tung, R. C. 2018. Scanning speed phenomenon in contact-resonance atomic force microscopy, *Beilstein journal of nanotechnology* 9: 945–952.

Gross, L.; Mohn, F.; Moll, N.; Liljeroth, P.; Meyer, G. 2009. The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic-Force Microscopy, *Science* 325: 1110–1114.

Gruskiene, R.; Krivorotova, T.; Staneviciene, R.; Ratautas, D.; Serviene, E.; Sereikaite, J. 2018. Preparation and characterization of iron oxide magnetic nanoparticles functionalized by nisin, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 169: 126–134.

Hodges, R. A.; Bussmann, M. K.; Hoha, H. J. 2001. Improved atomic force microscope cantilever performance by ion beam modification, *Review of scientific instruments* 72(10): 3880–3883.

- Hou, Y.; Wang, Z.; Li, D.; Qiu, R.; Li, Y.; Jiang, J. 2017. Cellular Shear Adhesion Force Measurement and Simultaneous Imaging by Atomic Force Microscope, *Journal of Medical and Biological Engineering* 37(1): 102–111.
- Hosaka, S.; Etoh, K.; Kikukawa, A.; Koyanagi, H. 2000. Megahertz silicon atomic force microscopy AFM cantilever and high-speed readout in AFM-based recording, *Journal of Vacuum Science & Technology Microelectronics and Nanometer Structures* 18: 94–99.
- Hosoi, A.; Koto, H.; Ju, Y. 2014. Fabrication of AFM probe with CuO nanowire formed by stress induced method, *Microsystem Technology* 20: 2221–2229.
- Ikai, A.; Afrin, R.; Saito, M.; Watanabe-Nakayama, T. 2017. Atomic force microscope as a nano-and micrometer scale biological manipulator: A short review, in *Seminars in cell & developmental biology* 73: 132–144.
- Yang, W.; Liu, X.; Lu, W.; Guo, X. 2018. Influence of probe dynamic characteristics on the scanning speed for white light interference based AFM, *Precision Engineering* 51: 348–352.
- Jazi, M. M.; Ghayour, M.; Ziaei-Rad, S.; Miandoab, E. M. 2018. Effect of size on the dynamic behaviors of atomic force microscopes, *Microsystem Technologies* 24(4): 1755–1765.
- Kahrobaiya, M. H.; Rahaeifard, M.; Ahmadian, M. T. 2011. Nonlinear dynamic analysis of a V-shaped microcantilever of an atomic force microscope, *Applied Mathematical Modelling* 35: 5903–5919.
- Kim, P.; Bae, S.; Seok, J. 2012. Resonant behaviors of a nonlinear cantilever beam with tip mass subject to an axial force and electrostatic excitation, *International Journal of Mechanical Sciences* 64: 232–257.
- Khurshudov, A. G.; Kato, K.; Koide, H. 1997. Wear of the AFM diamond tip sliding against silicon, *Wear* 204: 22–27.
- Korayem, M. H.; Damircheli, M. 2014. The effect of fluid properties and geometrical parameters of cantilever on the frequency response of atomic force microscopy, *Precision engineering* 38: 321–329.
- Korayem, M. H.; Nahavandi, A. 2015. Modeling and simulation of AFM cantilever with two piezoelectric layers submerged in liquid over rough surfaces, *Precision Engineering* 42: 261–275.
- Kuo, C. F. J.; Huy, V. Q.; Chiu, C. H.; Chiu, S. F. 2011. Dynamic modeling and control of an atomic force microscope probe measurement system, *Journal of Vibration and Control* 18: 101–116.
- Kurowski, P. 2013. Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2013, *SDC publications*, 1–12.
- Kwon, J.; Hong, J.; Kim, Y. S.; Lee, D. Y.; Lee, K.; Lee, S. M.; Park, S. 2003. Atomic force microscope with improved scan accuracy, scan speed, and optical vision, *Review of scientific instruments* 74(10): 4378–4883.
- Lei, H.; Cheng, N.; Zhao, J. 2018. Interaction between membrane and organic compounds studied by atomic force microscopy with a tip modification, *Journal of Membrane Science* 556: 178–184.

Lindley, V. 2012. *Landmarks – Atomic Force Microscope Makes Angstrom-Scale Images*. Physics 5: 106.

Lourier, A. I. 1961. *Analytical mechanics*. State publishing house of physical-mathematical literature. Moscow, 824 p.

Magonov, S. N. 1996. Surface Analysis with STM and AFM, *Experimental and theoretical aspects of image analysis*, 323 p.

Martin, J. M.; Fathy, H. K.; Houston, B. H. 2008. Dynamic simulation of atomic force microscope cantilevers oscillating in liquid, *Journal of applied physics* 104(4). [Online], [cited date 2016-05-18]. Available from internet: <https://doi.org/10.1063/1.2970154>

Mazeran, P. E.; Loubet, J. L. 1999. Normal and lateral modulation with a scanning force microscope, an analysis: implication in quantitative elastic and friction imaging, *Tribology Letters* 7: 199–212.

Matthew, W.; Fairbairn, S. O.; Moheimani, R.; Fleming, A. J. 2011. Improving the Scan Rate and Image Quality in Tapping Mode Atomic Force Microscopy with Piezoelectric Shunt Control, in *Australian Control Conference*, 21–26. Melbourne, Australia.

Matsson, J. E. 2013. An Introduction to SolidWorks Flow Simulation 2013, *SDC publications*, 1–39.

McCarty, R.; Mahmood, S. N. 2014. Parameter sensitivity analysis of nonlinear piezoelectric probe in tapping mode atomic force microscopy for measurement improvement, *Journal of applied physics* 115(7). [Online], [cited date 2016-04-18]. Available from internet: <https://doi.org/10.1063/1.4865793>

Moosapour, M.; Hajabasi, M. A.; Ehteshami, A. 2012. Frequency and sensitivity analysis of atomic force microscope (afm) cantilever considering coupled flexural-torsional vibrations, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* 7: 1103–1115.

Muller, M., Schimmel, T., Haußler, P., Fettig, H., Muller, O., Albers, A. 2006. Finite element analysis of V-shaped cantilevers for atomic force microscopy under normal and lateral force loads, *Surface and interface analysis* 38: 1090–1095.

Namvar, M.; Ghadiri, M.; Rezaei, E. 2018. Analytical modeling and experimental verification for vibration of piezoelectric U-shaped AFM incorporating thermal loading and surface effect, *Waves in Random and Complex Media*, 1–23.

Neumeister, J. M.; Ducked, W. A. 1994. Lateral, normal, and longitudinal spring constants of atomic force microscopy cantilevers, *Review of Scientific Instruments* 65: 2527–2531.

Nishida, S.; Kobayashi, D.; Sakurada, T.; Nakazawa, T.; Hoshi, Y.; Kawakatsu, H. 2008. Photothermal excitation and laser Doppler velocimetry of higher cantilever vibration modes for dynamic atomic-force microscopy in liquid, *Review of Scientific Instruments* 79(12). [Online], [cited date 2016-04-18]. Available from internet: <https://doi.org/10.1063/1.3040500>

O'Brien, T. J. 2014. A multiphase turbulence theory for gas–solid flows: I. Continuity and momentum equations with Favre-averaging, *Powder Technology* 265: 83–87.

Odin, C.; Aim, J. P.; Kaakour, Z.; Bouhacina, T. 1994. Tip's finite size effects on atomic force microscopy in the contact mode: simple geometrical considerations for rapid estimation of apex radius and tip angle based on the study of polystyrene latex balls, *Surface Science* 317: 321–340.

Pedersen, N. L. 2000. Design of cantilever probes for Atomic Force Microscopy (AFM), *Engineering Optimization* 32(3): 373–392.

Raman, A.; Melcher, J.; Tung, R. 2008. Cantilever dynamics in atomic force microscopy, *Nano today* 3: 20–27.

Rifai, E. K.; Rifai, E. O.; Youcef-Toumi, K. 2005. Modeling and control of AFM-based Nano-manipulation Systems, in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 157–162. Barcelona, Spain.

Rugar, D.; Mamin, H. J.; Guethner, P. 1989. Improved fiber-optic interferometer for atomic-force microscopy, *Applied Physics Letters* 55: 2588–2590.

Rogers, B.; Manning, L.; Sulchek, T.; Adams, J. D. 2004. Improving tapping mode atomic force microscopy with piezoelectric cantilevers, *Ultramicroscopy* 100: 267–276.

Rogers, B.; Sulchek, T.; Murray, K.; York, D.; Jones, M.; Manning, L.; Malekos, S.; Beneschott, B.; Adams, J. D. 2003. High speed tapping mode atomic force microscopy in liquid using an insulated piezoelectric cantilever, *Review of scientific instruments* 74(11): 4683–4686.

Russell, P.; Freddie, S.; Picco, L.; Day, J. C.; Shatil, N. R.; Yacoot, A.; Payton, O. D. 2018. 'Hi-Fi AFM': high-speed contact mode atomic force microscopy with optical pickups, *Measurement Science and Technology* 29(10): [Online], [cited date 2018-09-10]. Available from internet: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/aad771/pdf>

Russel, P.; Krause, O. 2008. AFM Probe Manufacturing. NanoWorld Services, 365 p.

Sader, J. E. 1995. Parallel beam approximation for V-shaped atomic force, microscope cantilevers, *Review of scientific instrument* 66: 4583–4587.

Sadewasser, S.; Villanueva, G.; Plaza, J. A. 2006. Special cantilever geometry for the access of higher oscillation modes in atomic force microscopy, *Applied physics letters* 89. [Online], [cited date 2015-09-10]. Available from internet: <https://doi.org/10.1063/1.2226993>

Salapaka, S.; Dahleh, M. 2000. A Model for Friction in Atomic Force Microscopy, in *Proceedings of the American Control Conference*, 2102–2107. Chicago, USA.

Salgar, M.; Srinivas, J. 2012. Modeling of AFM Microcantilevers operating in tapping mode, *International Journal of Applied Engineering Research* 7(11): 1347–1350.

Satoh, N.; Kobayashi, K.; Watanabe, S.; Fujii, T.; Matsushige, K.; Yamada, H. 2014. Scanning near-field optical microscopy system based on frequency-modulation atomic force microscopy using a piezoelectric cantilever, *Japanese Journal of Applied Physics* 53. [Online], [cited date 2015-09-10]. Available from internet: <http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.53.125201>

Satoh, N.; Tsunemi, E.; Kobayashi, K.; Matsushige, K.; Yamada, H. 2013. Multi-probe Atomic force microscopy using piezo-resistive cantilevers and interaction between probes, *E-journal of surface science and nanotechnology* 11: 13–17.

- Schitter, G.; Allgower, F.; Stemmer, A. 2004. A new control strategy for high-speed. Atomic force microscopy, *Nanotechnology* 15: 108–114.
- Schitter, G.; Thurner, P. J.; Hansma, P. K. 2008. Design and input-shaping control of a novel scanner for high-speed atomic force microscopy, *Mechatronics* 18: 282–288.
- Sebastian, A.; Salapakal, M. V.; Chen, D. J.; Cleveland J. P. 1999. Harmonic analysis based modeling of tapping-mode AFM, in *Proceedings of the American Control Conference*, San Diego, USA, 232–236.
- Song, Y., Bhushan, B.; 2006. Simulation of dynamic modes of atomic force microscopy using a 3D finite element model, *Ultramicroscopy* 106: 847–873.
- Song, Y., Bhushan, B.; 2007. Finite-element vibration analysis of tapping-mode atomic force microscopy in liquid, *Ultramicroscopy* 107: 1095–1104.
- Song, Y., Bhushan, B.; 2008. Atomic force microscopy dynamic modes: modeling and applications, *Journal of physics: condensed matter* 20. [Online], [cited date 2015-09-10]. Available from internet: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/20/22/225012>
- Stemmer, A.; Schitter, G.; Allgöwer, F. 2004. Robust two-degree-of-freedom control of an Atomic force microscope, *Asian Journal of Control* 6(2): 156–163.
- Stevens, R. M. 2009. New carbon nanotube AFM probe technology, *Materials today* 12(10): 42–45.
- Stirling, J.; Shaw, G. A.; 2013. Calculation of the effect of tip geometry on noncontact atomic force microscopy using a qPlus sensor, *Beilstein journal of Nanotechnology* 4: 10–19.
- Tello, M.; Garcia, R. 2001. Nano-oxidation of silicon surfaces: Comparison of noncontact and contact atomic force microscopy methods, *Applied Physics Letters* 79(3): 424–426.
- Tolenis, T.; Grinevičiūtė, L.; Kičas, S.; Buzelis, R. 2018. Enhancement of optical resistance in high reflectivity coatings using oblique angle deposition method, *Nanostructured Thin Films XI*. [Online], [cited date 2018-09-10]. Available from internet: <https://doi.org/10.1117/12.2323403>
- Turner, J. A.; Wiehn, J. S. 2001. Sensitivity of flexural and torsional vibration modes of atomic force microscope cantilevers to surface stiffness variations, *Nanotechnology* 12: 322–330.
- Ulčinas, A.; Vaitekoniš, Š. 2017. Rotational scanning atomic force microscopy, *Nanotechnology* 28. [Online], [cited date 2017-12-10]. Available from internet: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5af7>
- Zakaria, N. S.; Aziz, A. A. 2018. Effect of Medium on Interaction Forces between Atomic Force Microscopy (AFM) Tip and Gold Nanoparticle, *Journal of Physics: Conference Series* 1083(1): [Online], [cited date 2018-12-10]. Available from internet. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1083/1/012035>
- Zhang, Y.; Zhao, Y. 2007. Nonlinear dynamics of atomic force microscopy with intermittent contact, *Chaos, solitons and fractals*, 1021–1024.

- Zhong, Q.; Inniss, D.; Kjoller, K.; Elings, V. 1993. Fractured polymer/silica fiber surface studied by tapping mode atomic-force microscopy, *Surface science letters* 290: 688–692.
- Zhou, X.; Fang, Y. 2006. A Virtual Tapping-Mode Atomic Force Microscope, in *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 501–504., Zhuhai, China.
- Vazquez, R.; Rubio-Sierra, F. J.; Stark, R. 2006. Transfer Function analysis of a surface coupled Atomic force microscope cantilever system, in *Proceedings of the American Control Conference*, 532–537. Minneapolis, Minnesota, USA.
- Weber, J. C.; Blanchard, P. T.; Sanders, A. W.; Imtiaz, A.; Wallis, T. M.; Coakley, K. J.; Bertness, K. A.; Kabos, P.; Sanford, N. A.; Bright, V. M. 2014. Gallium nitride nanowire probe for near-field scanning microwave microscopy, *Applied physics letters* 104: 10–37.
- Wu, T. S.; Chang, W. J.; Hsu, J. C. 2003. Effect of tip length and normal and lateral contact stiffness on the flexural vibration responses of atomic force microscope cantilevers, *Microelectronic Engineering* 71: 15–20.
- Wang, D.; Yu, P.; Wang, F.; Chan, H. Y.; Zhou, L.; Dong, Z.; Liu, L.; Li, W. L. 2015. Improving Atomic Force microscopy imaging by a direct inverse asymmetric PI hysteresis model, *Sensors* 15: 3409–3425.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Dzedzickis, A.; Bučinskas, V.; Viržonis, D.; Šešok, N.; Ulčinas, A.; Iljin, I.; Šutiny, E.; Petkevičius, S.; Gargasas, J.; Morkvėnaitė-Vilkončienė, I. 2018. Modification of the AFM sensor by a precisely regulated air stream to increase imaging speed and accuracy in the contact mode, *Sensors* 18(8): 1–16. MDPI AG. 2018. ISSN 1424-8220 (Clarivate Analytics Web of Science).

Pelenis, D.; Dzedzickis, A.; Morkvėnaitė-Vilkončienė, I.; Bučinskas, V.; Barauskas, D.; Vanagas, G.; Mikolajūnas, M.; Katkus, J.; Viržonis, D. 2018. Non-contact sensing of elastic modulus of the UV cured furniture coatings by the transverse acoustical waves, *IEEE sensors journal* 18(16): 6527–6532. Piscataway, NJ: IEEE. ISSN 1530-437X (Clarivate Analytics Web of Science).

Bučinskas, V.; Dzedzickis, A.; Šutiny, E.; Šešok, N.; Iljin, I. 2017. Experimental research of improved sensor of atomic force microscope, *Advances in intelligent systems and computing. Recent advances in systems, control and information technology* 543: 601–609. Cham, Switzerland, Springer International Publishing AG. ISSN 2194-5357 (Scopus).

Bučinskas, V.; Dzedzickis, A.; Šutiny, E.; Lenkutis, T. 2017. Implementation of Different Gas Influence for Operation of Modified Atomic Force Microscope Sensor, in *Solid State Phenomena: Mechatronic Systems and Materials VIII* 260: 99–104. Pfaffikon, Trans Tech Publications Inc. ISSN 1662-9779 (Scopus, INSPEC).

Bučinskas, V.; Dzedzickis, A.; Šešok, N.; Šutinys, E.; Iljin, I. 2016. Research of modified mechanical sensor of atomic force microscope. *Dynamical systems: theoretical and experimental analysis*, 39–48. Łódź, Poland, December 7–10, 2015. Bern, Switzerland, Springer International Publishing. ISSN 2194-1009.

Dzedzickis, A.; Bučinskas, V.; Šešok, N.; Iljin, I. 2016. Modelling of mechanical structure of atomic force microscope, *Solid State Phenomena: Mechatronic Systems and Materials VII* 251: 77–82. Pfaffikon, Trans Tech Publications Inc. ISSN 1662-9779 (Scopus, INSPEC).

Dzedzickis, A.; Bučinskas, V. 2014. Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros analizė, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 6: 589–594. Vilnius, Technika. ISSN 2029-2341.

Summary in English

Formulation of the problem

With the advances in science and technology, newly-developed equipment and devices becoming smaller, and there is an increasing need for researches at the micro and nanotechnology level. Optical devices for such research are inappropriate due to the limit created by physical phenomena – the wavelength of the light, which limits the use of optical devices in nanotechnology. Atomic force microscopy is one of the most successful method for evaluating topology of a various surface in nanometric level. Using this method, the surface is scanned with a probe – a thin needle attached to the sensor (cantilever) which deformation depends on the surface properties. This method enables the visualization of micro and nanostructures, but the application of this method has developed new problems. The surface scanning process is quite slow and limited by various issues, one of them is the dynamic characteristics of the mechanical sensor of the atomic force microscope. This issue is still relevant, although the technique of atomic force microscopy has been used for research purposes since 1986.

Current researches on the improvement of atomic force microscopy can be classified into several groups: researches of the dynamic characteristics of sample positioning systems, researches of the optical displacement measuring systems, and researches of the mechanical structure of the sensor. The atomic force microscope (AFM) is commonly used to determine the surface structure of a material, but can also be used in researches of various properties of materials and their surfaces such as adhesion, friction, or viscosity.

With the growing number of researches, which require AFM, the questions – how to increase the speed of this device and how to select scanning parameters for various materials remain relevant.

According to previous researches, the AFM scanning speed is mostly limited by the dynamic characteristics of a sensor's mechanical structure. This structure is a mechanical part of the microscope, which production is quite complicated process. It is not always possible to find sensors in the market that are optimal for scanning the surfaces of specific materials, and therefore the issue of ensuring optimal sensor performance is still relevant.

The dissertation focuses on the research of the mechanical structure of the atomic force microscope and on the control of its characteristics.

Relevance of the thesis

With the rapid growth of researches, in which AFM is used, the low AFM scan speed remains an important issue. In order to increase the speed of scanning, new challenging scientific and technological task should be solved. The numerical and experimental analysis of the mechanical structure of the AFM sensor encounters complex problems in the modeling and production fields due to a complex physical system.

Research and control of dynamic characteristics of AFM sensor allow to achieve the required AFM sensor parameters scanning in various materials. This research allowed to develop a new control method for controlling the stiffness of a mechanical sensor part. The proposed method will allow to increasing the scanning speeds of atomic force microscopes, without substantially changing the original AFM structure.

The object of the research

The object of research is the dynamic processes of the mechanical of the atomic force microscope.

The aim of the thesis

The aim of this thesis is to perform research on the AFM creating theoretical and experimental models of surface scanning system.

The tasks of the thesis

The following objectives are set in order to achieve the aim of the thesis:

1. To review the scientific literature of AFM sensor research in order to identify the main factors, limiting scanning speed.
2. To create a mathematical model of AFM sensor with implemented aerodynamic force.
3. To research and evaluate the suitability of the proposed AFM sensor, for the researches of real structures at increased scanning speeds.
4. To create a test rig for the verification of AFM sensor characteristics.
5. Evaluate the accuracy of the AFM using a modified sensor by comparing the shape of scanned reference surface with the shape declared by the manufacturer.

Research methodology

In this thesis, theoretical calculations based on the principles of theoretical mechanics, vibration theory and measurement theory, applying analytical, empirical and numerical methods of scientific research were made. Original samples produced in Germany, Institute of Microtechnology in the Braunschweig Technical University using the photolithography method were used for theoretical and experimental research. The surface topography of the samples was evaluated using contact and non-contact measuring methods. Obtained data was used to find out the theoretical possibilities of increasing AFM's speed. Practical experiments were carried out at the Laboratory of State research institute Center for Physical Sciences and Technology at the Institute of Physics, using the improved AFM. Results of the experiments were analyzed evaluating the effect of increased speed on the quality of the measurement comparing obtained results with the reference surface.

Scientific novelty of the thesis

The following new results for the science of mechanical engineering were obtained, while preparing a doctoral dissertation:

1. A new method for increasing the scanning speed of the AFM without changing the design of the AFM sensor, was proposed and researched.
2. A mathematical model of AFM sensor which allows to choose suitable control parameters, when system stiffness is controlled using the mechatronic compressed air control system, was created.
3. An original mechatronic experimental test rig in which compressed air supply system is implemented, was created and practically realized.

Practical value of the research findings

Proposed AFM scanning speed increasing method allows to reduce sample scanning time and creates the ability to adjust AFM sensor parameters according to the properties of the surface to be scanned. This combination of parameters effectively increases the reliability of scanning results. Proposed technique changes the dynamic characteristics of the sensor, thereby reducing the chance of contact loss between the probe and scanned surface during scanning samples at high speeds.

The proposed method can also be applied to additional cases of use of AFM, where it is necessary to change the dynamics of the cantilever or to control the movement of the sensor cantilever by measuring or manipulating various nanostructures.

Defended statements

1. The mathematical model of the modernized AFM, which allows to evaluate the dynamic response of the AFM cantilever scanning surfaces of various samples at various speeds, was created.
2. The proposed AFM scanning speed enhancement method is universal: it can be applied to various AFM's without significantly altering their design; can be used with cantilevers of various stiffness; is suitable for measuring samples which have various properties.

3. The proposed method of AFM scanning speed enhancement allows to improve the quality of the AFM measurement results. The error of the scanned surface profile from the reference surface on the horizontal axis decreases by 20 % comparing to the case then non-modified AFM is used at scanning speed of 847.6 $\mu\text{m/s}$.

Approval of the research findings

Seven articles were published on the topic of the dissertation: two in journals included in the Clarivate Analytics WoS database, one in conference materials included in the Clarivate Analytics WoS database, four in other international database journals. The results of the dissertation research were published at four international scientific conferences in Lithuania and abroad:

- International Conference “13th International Conference on Dynamical Systems Theory and Applications”, 2015. Lodz, Poland.
- International Conference “International Conference of Mechatronics Ideas for Industrial Applications” 2015 Gdansk, Poland.
- International Conference “11th International Conference of Mechatronic Systems and Materials”, 2015. Kaunas, Lithuania.
- International Conference “Advanced Materials and Technologies: 19th International Conference-School” 2017. Palanga, Lithuania.

The structure of the dissertation

The dissertation includes the introduction, three chapters and general conclusions. The volume of the work is 108 pages of the text (without annexes), containing 43 pictures 4 tables 32 numbered equations. 103 literature sources were used in the dissertation.

1. Analysis of atomic force microscope sensors and their researches

Atomic force microscopy is widely used for measurements of various properties of materials, including surface topography, friction, adhesion, and viscoelasticity on an atomic scale. There are defined three main operating modes of AFM: contact mode, tapping mode, non-contact mode. All AFM operating modes are based on measurements of interaction forces between a scanning probe tip and a sample surface. Analysis of earlier mentioned interaction force provides spatial information parallel and perpendicular to the scanned surface. The mechanical part of the AFM sensor consists of two main elements – probe and microcantilever. The sensor probe is attached to the free end of microcantilever; another end of the cantilever is attached to moving platform driven by computer-controlled piezoelectric drives. During scanning process probe interacts with imperfections of the sample surface and creates deflections of the cantilever. The surface properties obtained by observing the cantilever deflections, which usually are measured using laser measurement system. AFM control system tries to keep constant force between probe and sample surface. Data about surface topography is generated analysis properties of feedback signal. Structural scheme of typical AFM presented in Figure S1.1.

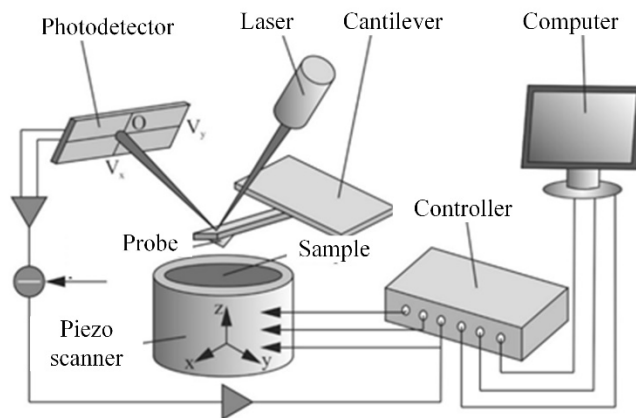


Fig. S1.1. Structural scheme of atomic force microscope

The main limitation of AFM in contact mode is low scanning speed, which depends on multiple dynamic factors, such as the bandwidth of the probe detection system, the sample positioning system, probe type, probe and surface material, etc. Also, the data transfer and processing capabilities will limit the data acquisition speed.

Various approaches have been used to resolve this problem, such as: (i) designing a new type of actuators; (ii) improving both the optical beam deflection and the electronic readout systems; (iii) using a self-actuating high quality piezoelectric lead zirconate titanate (PZT) cantilever with piezo resistors; (iv) using small cantilevers; (v) using a high-resonant-frequency cantilever; (vi) using high resonance frequency, thermally actuated piezo-resistive cantilevers; (vii) utilizing a Q-controlled natural vibration shape of an AFM cantilever. All these ideas are based on the introduction of new devices to the sensory part or for improvement of the AFM control system. In general, solutions of this type could not be applied to AFMs of different configurations. Therefore, a more versatile and convenient AFM speed improvement system is needed.

Together with the limited bandwidth of the AFM scanner, one of the main factors limiting scanning speed is the dynamic behavior of the cantilever, causing the excitation of the higher modes of cantilever vibration, or complete loss of contact with the surface. The surface properties in contact mode AFM are revealed by observing the cantilever deflections caused by the tip – sample interaction around the initial set interaction force. Low initial interaction force allows scanning of soft and biological surfaces without damage. However low initial interaction force and high scanning speed can lead to contact loss between the probe and the surface if the feedback system does not have sufficient bandwidth to maintain the constant interaction force. Increase of the initial interaction force is one of the possible solutions to resolve this issue; however, as the scanning speed and surface roughness increase, the interaction force needs to increase as well, reaching unacceptable levels, since in the case when interaction force is higher than repulsive Van der Waals force, the probe can adhere onto a surface.

A proposed solution would include additional nonlinear spring, which exerts an increasing downward force on the probe. A new engineering solution, the idea of adding such a nonlinear spring without changing the hardware part of the sensor, is proposed in this report. The cantilever's tip and surface interaction in such a system is controlled by an additional force, which is created by the air stream. In the case where the cantilever's tip loses contact with the surface at high scanning speed, the air stream helps to keep the probe and surface in contact, due to the nonlinear controlled compressive force.

On the other hand, the air stream creates additional stiffness in the AFM sensor, and this should not create any additional force when the contact between the tip and the surface is stable. The air stream pressure and velocity are low; thus, its possible to create a vibration of any kind, or interact with a hard sample surface, is far beyond the limit. For the introduction of the airflow with the microscope, it is enough to produce a cantilever holder with an installed micro air duct and a precise airflow control system. The effect of an applied aerodynamic force depends on: the initial gas pressure, the air duct diameter and shape, and the initial gap size between air duct and cantilever surface.

The present research is aimed at the development of the mathematical model, design of the modified AFM cantilever holder with an air duct and experimental evaluation of the effectiveness of the proposed method.

2. Analytical-numerical research of the atomic force microscope sensor

The goal of the analytical-numerical research is to analyze the impact of implemented additional nonlinear force to the AFM sensor characteristics. In order to achieve this goal mathematical model of modified AFM sensor was created.

In created model cantilever is assumed as a rod with a rectangular cross-section and it is approximated by two elastic elements with a concentrated mass at the ends. It is assumed that each element has a mass and a moment of inertia, which are used to evaluate the deflection and rotation angle of the rod's end. In the lumped mass model, the mass of each element is transferred to the end point of the elastic element as shown in Figure S2.1. Therefore, the moment of the rod's inertia around its attachment point is evaluated. Supposing that the cantilever is made from silicon nitride; the properties of this material correspond to the Kelvin-Voigt material model. The main system coordinates are η_1 , γ_1 , η_2 , γ_2 , and they describe linear and rotational displacements of cantilever points of interest. The initial clamping force of the cantilever is approximated by a constant force F_2 , which acts in the negative coordinate η_2 direction. The model also includes a nonlinear force F_1 , created by the airflow. This force depends on the gap size between the air supply tube and the cantilever surface:

$$F_1 = f(\Delta_0 - \eta_1), \quad (2.1)$$

where Δ_0 – size of the initial gap between the end of the air duct and the cantilever upper surface, when the cantilever is not affected by air stream.

The dynamic model of mechanical part of AFM sensor presented in Figure S2.1.

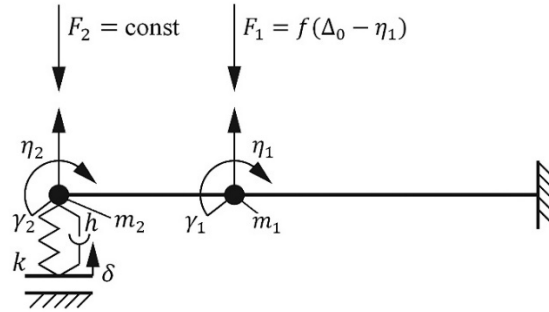


Fig. S2.1. Dynamic model of the atomic force microscope mechanical sensor system (Dzedzickis *et al.* 2015)

The roughness of the sample surface, which kinematically excites system oscillations, is described by coordinate δ . The probe is approximated by an elastic element with the coefficient of stiffness k , and damping with the coefficient of damping h . The elasticity of the cantilever is evaluated by the cross-section parameter. It is considered that the linear probe movements are described by coordinate η_2 . The mathematical model created using Lagrange equations of the second type in the matrix form.

The final system of equations for cases when the value of stiffness k and damping h was nonzero and zero were obtained. Obtained equations are solved with respect to the second derivatives of generalized coordinates. For each equation, the corresponding structural diagram and the MatLab/Simulink model was built. All these diagrams, which represent the corresponding equations, are connected into one general structural diagram. Nonlinear elements in the equations are excluded into different blocks. The simplified structural schematic is presented in Figure S2.2

The dynamic model of the AFM sensor consists of three structural blocks. The main block of the structural diagram represents the linear part of the system. The input of this block is generalized coordinate, depending on the roughness of the sample surface; the output is the generalized coordinates of the beams. The force block represents an effects created by nonlinear force and additional stiffness. The state block controls the state of the additional force. This block controls contact integrity and disconnects a contact stiffness when contact force from compressive changes direction to tensile one.

The parameters of the aerodynamic force were determined from the theoretical 3D model of the microscope cantilever using the finite element method. This model describes the dependencies among the air gap, the pressure of compressed air and the resulting force on the cantilever.

The AFM dynamic system was simulated in two cases: with non-modified AFM sensor and modified AFM sensor, using two types of cantilevers (Table S2.1).

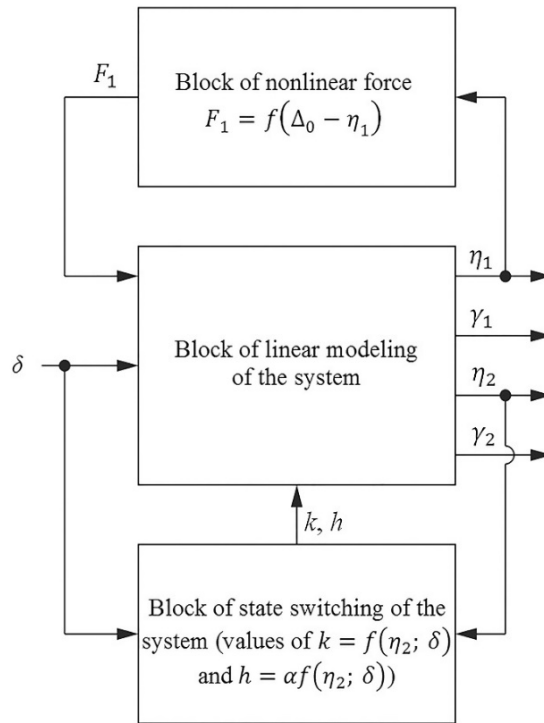


Fig. S2.2. Schematic Simulink diagram of mathematical model: δ – coordinate of kinematic excitation, η_1 , γ_1 , η_2 , γ_2 – output coordinates (Dzedzickis *et al.* 2015)

Table S2.1. Main parameters of modeled cantilevers

Parameter	Case 1: stiff cantilever	Case 2: soft cantilever
Length L , μm	117	450
Mass m_1 , kg	5.31×10^{-11}	9.53×10^{-11}
Mass m_2 , kg	2.65×10^{-11}	4.77×10^{-11}
Resonant Frequency f , kHz	320	13
Size of the initial gap Δ_0 , mm	0.4	0.4
Diameter of air duct, mm	0.2	0.2
Spring Constant k , N/m	40	0.2
Thickness t , μm	3.5	2
Width w , μm	33	50
Young's modulus E , GPa	310	310
Manufacturer	Bruker	NanoWorld Services
Type	NCHV	CONTR

In both simulated cases we obtained results which show positive effect created implementing controllable air stream to AFM sensor system.

First set of results presented in Figure S2.3 was obtained by using stiffer cantilever (Table S2.1), designated for tapping or intermittent contact AFM modes. Implementing of the stiffer cantilever with applied air stream brings good results. Contact loss was observed applying much more speed comparing to a normal case (112 $\mu\text{m/s}$): 11.2 mm/s (Fig. S2.3 a), and 1.12 m/s (Fig. S2.3 b). It is seen from Figure S2.3 b that scanning with high-speed cantilever's tip gives very high displacement, two times higher than the input signal. However, the sensor with applied pressure (60 Pa) shows the response close to the input signal.

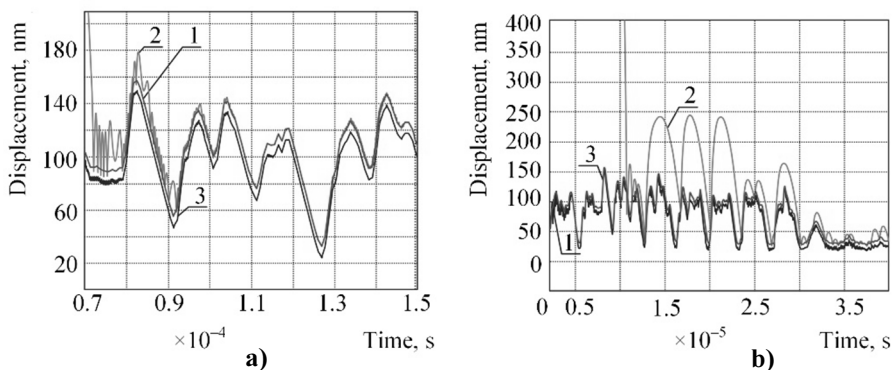


Fig. S2.3. The displacement of stiff cantilever (case 1 in the Table S1) response to excitation, obtained using experimental data as an input signal: a) scanning speed 11.2 mm/s, b) scanning speed 11.2 m/s. Applied pressure 60 Pa; 1 – excitation signal; 2 – response of non-modified atomic force microscope sensor; 3 – response of the modified sensor

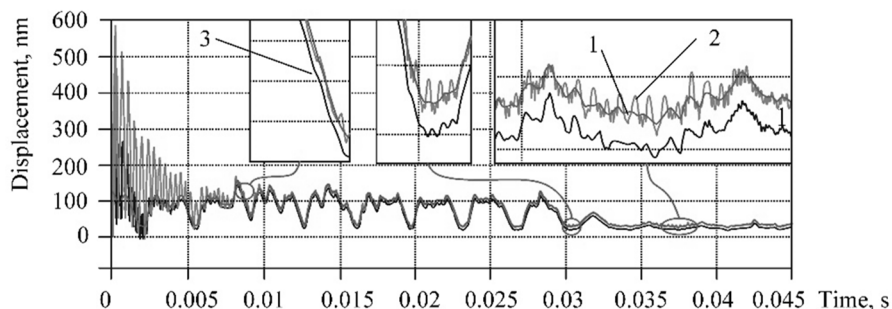


Fig. S2.4. The displacement of soft cantilever (case 2 in the Table S1) response to excitation, defined using experimental data as an input signal. Scanning speed 1120 $\mu\text{m/s}$, applied pressure 60 Pa; 1 – excitation signal; 2 – response of non-modified atomic force microscope sensor; 3 – response of the modified sensor

Another simulation done using soft cantilever (Table S2.1) at the speed, ten times higher than initial one (1120 $\mu\text{m/s}$) with the same pressure (60 Pa) applied. Results obtained from this simulation presented in Figure S2.4. From figure S2.4 it is seen that soft cantilever under the impact of compressed air stream behaves similarly as a stiff one. There was observed that response signal from modified sensor is lower than input one. This could be explained as the too high pressure being applied, which disturbed the cantilever and contact force between the probe and the sample surface was increased. On the other hand, in this case, non-modified sensor gives a higher level of the signal/noise level. We tried to simulate the same case using lower pressure values, and it was found that lower pressure useful in case of the softer cantilever. However, if pressure is too low (20 Pa), its influence to measurement results on some deeper valleys is limited.

Analyzing results obtained from the mathematical model it has been determined that proposed AFM sensor modification method can significantly increase the scanning speed, which depends on the topography of the sample, the characteristics of the used AFM hardware and the parameters of used cantilevers. A positive effect created by aerodynamic force is detected using both a stiff and a soft cantilever. The most suitable compressed air pressure for a stiff cantilever is 60 kPa for soft 40 kPa. The effect created by aerodynamic force also is defined performing experimental research.

3. Experimental research of the modified sensor of atomic force microscope

Experimental research was performed in the Laboratory of Center for Physical sciences and technology. Cantilever's vertical displacement was measured by home-made AFM setup using a modified AFM sensor with cantilever, type NCHV from Bruker (MA, USA) (Table S2.1, Case 1: stiff cantilever). Specially produced AFM setup was composed using standard components from reliable producers. Main components of AFM setup are: 3d printed housing, AFM head based on a DVD optical pickup, manual micrometer translation stage, closed-loop 3d Nanopositioning stage (Nano-M350, Mad City Labs, USA). The structure of AFM setup is multi-level, first on the base is mounted manual translation stage for rough positioning; on the top of this stage is mounted nanopositioning stage Nano-M350 for precise positioning of scanned sample. Nanopositioning stage has its own control system and allows precise positioning under closed-loop control. Nanopositioning XY travel range is 50 μm and 20 μm in the Z axis with resolution 0.4 nm in Z axis and 0.1 nm in XY axes. AFM head with attached cantilever and specially designed holder is mounted on the top of AFM housing.

For the precise supply of clean compressed air, a special mechatronic system was designed (Figure S3.1). The pressure of compressed air in the system is controlled by changing the efficiency of the micro compressor according to the desired pressure and output pressure measured using the pressure sensor MPXV5050GP (Freescale Semiconductor, Austin, TX, USA).

For the control of the whole test rig, measurement system adjustment, calibration and result processing, the LabView based custom developed software was used. The control program allows to adjust the pressure of compressed air and record the displacement of the cantilever simultaneously.



Fig. S3.1. Air supply system

The scanning experiments were performed using the NCHV cantilever (Table S2.1, Case 1: stiff cantilever). Horizontal scanning data, was obtained by scanning the rectangular cross-section calibration grating APCS-0099 from Bruker (MA, USA) with a height of 240 nm ($2\text{ }\mu\text{m}$ pitch). Horizontal scanning was performed at $112.5\text{ }\mu\text{m/s}$ scanning speed in contact mode. In order to increase the linear velocity between the probe and the surface of the sample until the effect of the aerodynamic force becomes noticeable, it has been decided to scan using circular trajectories. By scanning a circular arc of $15\text{ }\mu\text{m}$ in diameter, this solution allowed to achieve a linear scanning speed of $847\text{ }\mu\text{m/s}$ and have a scanned $94.2\text{ }\mu\text{m}$ length line. It was decided to use a calibration grating for this experiment because the previous experiments showed that the form of produced samples is not ideal, which makes it difficult to process the obtained results, in particular, to evaluate the results with numerical parameters. The scanning results of the calibration grating at various speeds using different values of compressed air pressures were evaluated using three parameters as shown in Figure S3.2.

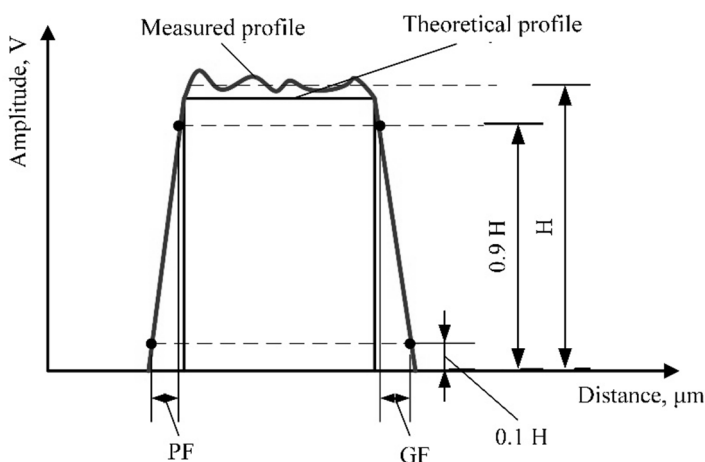


Fig. S3.2. Scheme of experimental results evaluation

Results of the experiments are evaluated by comparing the measured height of the structure H, the steepness of forward signal front PF and the steepness of backward signal front GF.

Comparison of amplitude allows to detecting changes in the vertical axis due to changes in scanning speed and added aerodynamic forces. The steepness of the forward and backward front of the signal is evaluated on the basis of the assumption that the theoretical surface step (calibration grate) is ideally perpendicular. Both fronts of the signal are evaluated in order to define the effect of the aerodynamic force when, when the cantilever rises on the “step” and moves from it. In order to ensure the reliability of the measurement data according to the described method, 5 freely chosen “steps” from the curves obtained by scanning the calibration grate were evaluated. At the initial stage of data processing, OriginPro 8.0 was used. Parameters PF and GF evaluated using OriginPro 8.0's rise/fall tool dedicated for signal analysis. The statistical processing of the received data was performed using the Microsoft Office 2016 software package. The results of the comparison of amplitudes (H) in the graphic form are presented in Figure S3.3.

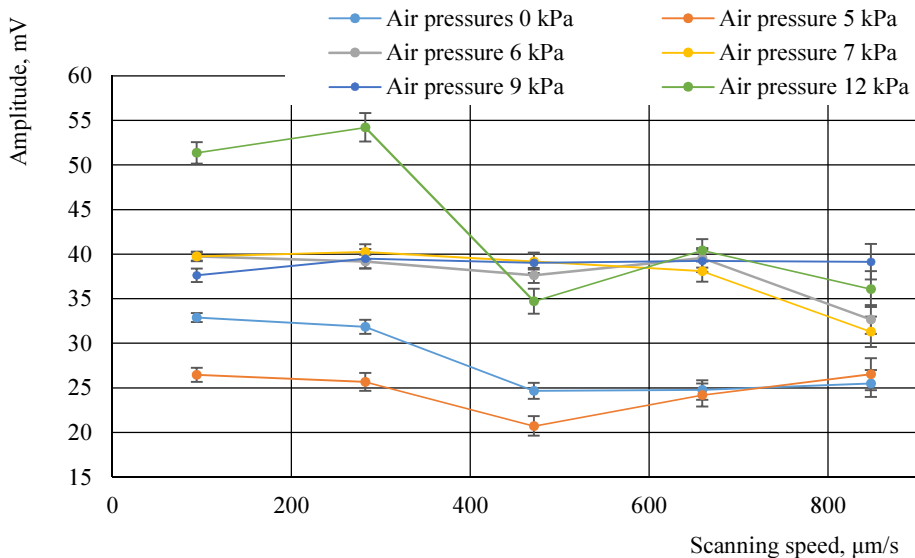


Fig. S3.3. Comparison of measured amplitudes

In Figure S3.3, which shows the measured dependencies between amplitude and scanning speed, it is seen that the amplitude increases then air flow is used excepting cases when the air pressure was 5 kPa and the scanning speed did not exceed 650 μm/s. The difference in obtained amplitude values can be explained by the fact that the flow of compressed air decreases the lever's bounce at the beginning of the “step” and by the fact that the probe faster takes lower position and more accurately estimates the surface at the bottom of the “step”. The hypothesis that the probe is not always able to reach to the bottom of the “step” is confirmed by the dependence between the amplitude and scanning speed

when aerodynamic force is not used, in this case then scanning speed increases up to $450\text{ }\mu\text{m/s}$, the amplitude value decreases from 33 mV to 25 mV and decreases increasing scanning speed. This indicates that at this speed is reached a threshold when the speed of the feedback or the piezo scanner z -axis is not sufficient to respond adequately to the surface roughness. The decrease in amplitude when using a compressed air flow of 5 kPa pressure is explained by the fact that under such scanning conditions the air flow effects are not effective enough because of the lack of air flow and low scanning speed the surface forms “air bags” that interfere with the probe when it tries to reach bottoms of the surface valleys. This effect weakens when scanning speed exceeding limit of the $450\text{ }\mu\text{m/s}$. The stable amplitude values are obtained when the compressed air pressure is 6 kPa and 7 kPa . At such pressures, the decrease of the amplitude occurs in case when scanning speed is exceeding $650\text{ }\mu\text{m/s}$. In contrast, the increase in scanning speed from $100\text{ }\mu\text{m/s}$ to $300\text{ }\mu\text{m/s}$ shows the increase of amplitude from 38 mV to 40 mV . This is explained by the fact that under such pressure at low scanning speeds, conditions correspond to the case when the pressure of 5 kPa was used, aerodynamic forces on the sample surface create an aerodynamic force that prevents the stable contact between probe and sample surface. A large scattering of points when the pressure of compressed air is 12 kPa indicates that in this case the air flow effect is very unstable, it is likely that the air pressure is too high. Summarizing the results presented in Figure S3.3 it can be stated that the positive effect of the aerodynamic force on the measured amplitude size (H) in the range of scanning speeds from $100\text{ }\mu\text{m/s}$ to $650\text{ }\mu\text{m/s}$ is observed when the pressure of compressed air is $6\text{--}7\text{ kPa}$. A positive effect of compressed air pressure 9 kPa is detected when scanning speed is in the range from $300\text{ }\mu\text{m/s}$ to $840\text{ }\mu\text{m/s}$. Comparison of measured height of unequal structures allows us to judge only about the effect of aerodynamic force by scanning sufficiently smooth structures when the probability of loss of contact between the probe and the sample surface is low. The influence of aerodynamic forces on the scanning structures with sharp changes in surface topology makes can be evaluated using parameters PF and GF (Figure S3.2). The values of parameter (PF) describing the steepness of the forward signal's front are shown in Figure S3.4.

The curves presented in figure S3.4 describes the effect of aerodynamic force in case when structures with unequal height are scanned and when the probe has to “climb” on a high “heel”. The minimum deviation is obtained by scanning calibration grating at speed $94\text{ }\mu\text{m/s}$. In this case, the effect of an aerodynamic force is only visible when air pressure excess value of 9 kPa and created effect is negative as the deviation increases. This can be explained by the fact that the high air pressure increases the stiffness of the cantilever, and this prevents the cantilever from “jumping” on the step. As the scan speed increases, appears pressure range of the compressed air in which positive effect of the aerodynamic force is noticeable. As the scanning speed increases up to $282\text{ }\mu\text{m/s}$ and the air pressure is $6\text{--}7\text{ kPa}$, the deviation from geometric shape of the calibration grating decreases from $0.31\text{ }\mu\text{m}$ to $0.17\text{ }\mu\text{m}$ comparing to the case when compressed air flow is not used. When a scanning speed is $471\text{ }\mu\text{m/s}$, the deviation reduces from $0.31\text{ }\mu\text{m}$ to $0.27\text{ }\mu\text{m}$. In addition, increasing the scan speed from $659.7\text{ }\mu\text{m/s}$ to $847.8\text{ }\mu\text{m/s}$, the deviation decreases from $0.35\text{ }\mu\text{m}$ to $0.34\text{ }\mu\text{m}$ and from $0.43\text{ }\mu\text{m}$ to $0.41\text{ }\mu\text{m}$. Summarizing the results presented in figure S3.4, it can be stated that in case when compressed air pressure is in range from 6 kPa to 7 kPa positive effect of aerodynamic force is noticeable scanning at all speeds

tested in the experiment. The use of 5 kPa, 9 kPa and 12 kPa pressure in the researched cases create the increase of deviations (PF), this can be explained by low air stream velocity at 5 kPa pressure and excessive air flow in cases when air pressures are 9 kPa and 12 kPa.

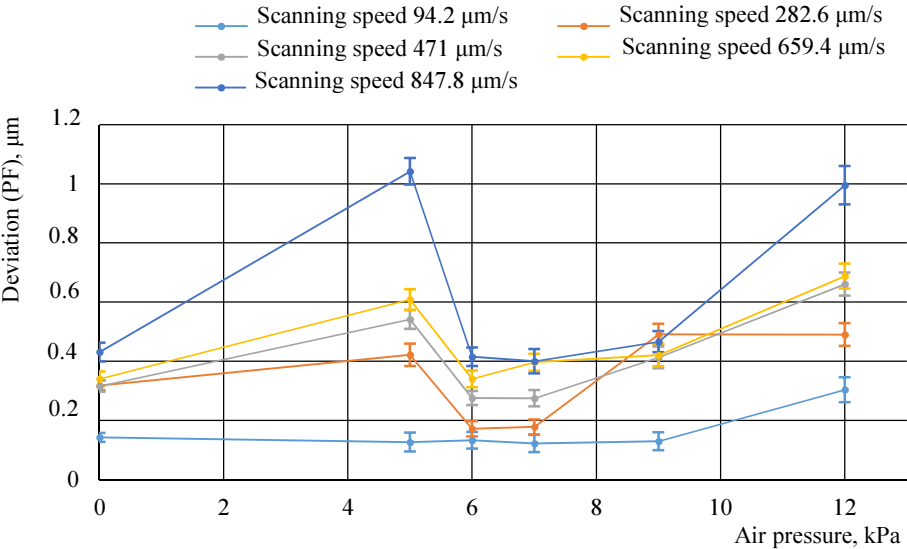


Fig. S3.4. Dependencies of parameter PF on scanning speed and pressure of the compressed air

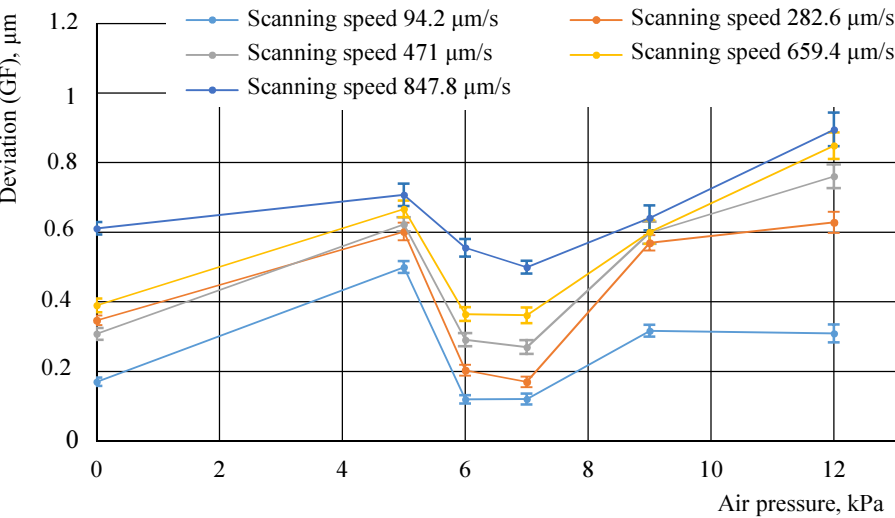


Fig. S3.5. Dependencies of parameter GF on scanning speed and pressure of compressed air

The results presented in Figures S3.3 and S3.4 allows to state that the use of aerodynamic force produces a positive effect and creates preconditions for increasing AFM scanning speed. However, in order to fully assess this effect, GF parameter, which defines the steepness of signal rear front should be evaluated. The dependency of parameter GF on the scanning speed and pressure of used compressed air are shown in Figure S3.5.

From Figure S3.5 it is seen that positive effect created by aerodynamic force is observed when the compressed air pressure is from 6 kPa to 7 kPa. In this case, the deviation GF is reduced from 0.18 μm to 0.11 μm at scanning speed 94 $\mu\text{m/s}$. Increasing scanning speed up to 280 $\mu\text{m/s}$, deviation decreases from 0.34 μm to 0.2 μm compared to the case when the flow of compressed air is not used. By further increasing the scanning speed, the trend of deviation decrease remains. In cases when scanning speed is 470 $\mu\text{m/s}$ and 670 $\mu\text{m/s}$, deviation is reduced from 0.32 μm to 0.27 μm and from 0.39 μm to 0.36 μm , respectively. In case when scanning speed is increased up to 847 $\mu\text{m/s}$, deviation decreases from 0.61 μm to 0.49 μm .

Summarizing results of experimental research, it can be stated that the effect of the aerodynamic force is experimentally evaluated. It is obtained positive effect created by the aerodynamic force for all 3 analyzed parameters scanning a calibration grate at all tested speeds in case when the pressure of compressed air is from 6 kPa to 7 kPa. Experimental research confirms the results of simulation and allows to state that proposed AFM speed enhancement method is effective. Selection of suitable air pressure values according to the type of structure being scanned, creates conditions which allow to increase AFM scanning speed and improve quality of the results.

General conclusions

Summarizing the results of the dissertation, the following statements could be drawn:

1. After the review of scientific literature related to atomic force microscopes, it has been determined that the problem of increasing AFM scanning speed is still important and limited by dynamic characteristics of the sensors and possibilities to control them.
2. A mathematical model of improved AFM sensor which allows to define the dynamic response of the AFM sensor cantilever scanning samples of different materials at various speeds using an additional control effect was developed. The model's adequacy was evaluated by comparing the results of the modeling and experiment. Scanning a calibration grating, the difference between the model and experiment results does not exceed 6.5%.
3. Theoretical research confirmed the effectiveness of the proposed AFM scanning speed increasing method. The modeling results indicate that depending on the type of used cantilever, the scanning speed can be increased by at least 10 times if it is allowed by the used hardware.
4. An experimental test rig was designed for the research of the characteristics of the AFM sensor, which allows achieving scanning speed greater than 847.6 $\mu\text{m/s}$ in contact mode and allows to control the pressure of compressed air in range from 0.5 kPa to 50 kPa.

5. Experimental research shows that the stiffness of the various AFM sensor cantilevers can be controlled using the proposed method. The positive effect of the aerodynamic force on all evaluated parameters is defined when compressed air pressure is in range of 6–7 kPa. It has been determined that the use of aerodynamic force has the greatest influence on the parameter GF, which describes the deviation of the measured results from the actual sample on the horizontal axis when probe moves downwards. With a compressed air pressure of 7 kPa and scanning speed 847.6 $\mu\text{m/s}$, this deviation is reduced by 120 ± 18 nm compared to the case when compressed air is not used.

Priedai¹

A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija.

B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti bendroje publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.

C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Andrius DZEDZICKIS

ATOMINIŲ JĖGŲ MIKROSKOPO
JUTIKLIO MECHANINĖS STRUKTŪROS MODELIAVIMAS
IR DINAMINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija (T 009)

MODELLING OF MECHANICAL STRUCTURE OF
ATOMIC FORCE MICROSCOPE SENSOR AND
RESEACH OF ITS DYNAMIC CHARACTERISTICS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Mechanical engineering (T 009)

2019 02 21. 10,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius